



**HAL**  
open science

# Transition énergétique et dynamiques territoriales

Fiona Bénard

► **To cite this version:**

Fiona Bénard. Transition énergétique et dynamiques territoriales. Architecture, aménagement de l'espace. Université de La Réunion, 2022. tel-04322672

**HAL Id: tel-04322672**

**<https://hal.univ-reunion.fr/tel-04322672>**

Submitted on 17 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION**  
FACULTÉ SCIENCES DE L'HOMME ET DE L'ENVIRONNEMENT  
**ÉCOLE DOCTORALE 541**  
SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

# **HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES**

Présentée par  
**Fiona BÉNARD**

---

## **Transition énergétique et dynamiques territoriales**

---

Laboratoire **PIMENT** – EA 4518  
9 décembre 2022

**Jury :**

*Rapporteurs :* Bernard PECQUEUR - Professeur , Université Grenoble Alpes  
Dominique MIGNOT - Dr-HDR , Université Gustave Eiffel  
Monica SIROUX - Professeur, INSA Strasbourg

*Examineurs :* Michel DIMOU - Professeur, Université de Toulon  
François GARDE - Professeur, Université de La Réunion  
Louafi BOUZOUINA - Dr-HDR, ENTPE, Université de Lyon



à Jérôme,  
à Léon & à sa petite sœur.



---

## Remerciements

**J**E souhaiterais remercier, tout d'abord, les Professeurs Monica Siroux, Bernard Pecqueur, le Dr. HDR Dominique Mignot, rapporteurs de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches, et le Professeur François Garde, le Dr. HDR Louafi Bouzouina, examinateurs de ce mémoire, d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je souhaiterais remercier, ensuite, le professeur Michel Dimou, qui a joué le rôle de garant de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses encouragements, mais surtout sa franchise tout au long de la construction de ce mémoire. Bien plus qu'un simple garant, tu as été un véritable mentor pour moi tout au long de mon parcours.

La recherche est un travail collaboratif et j'ai rencontré dans mon parcours de nombreux chercheurs d'exception, des étudiants, acteurs de terrains et autres collaborateurs avec qui j'ai eu l'opportunité d'échanger, publier et avancer dans mes travaux de recherche. Sans pouvoir les nommer tous, je pense à Jean-Philippe, qui a accompagné une grande partie de mon parcours. Merci pour ces collaborations fructueuses et nos nombreux échanges qui ont animé mes premiers pas dans la recherche et pour les nombreux projets à venir.

Je pense à l'ensemble des membres du SBE, une vraie petite famille dans laquelle je compte nombre de mes plus proches amis. Notre pluridisciplinarité est, sans aucun doute, une vraie richesse et chacun d'entre vous a participé de près, ou de loin, à mes réflexions scientifiques tout au long de mon parcours. Je pense notamment à Jean-Claude qui, a bien des égards, a été mon plus grand soutien tout au long de ma carrière.

Je pense à toutes les nouvelles collaborations initiées depuis deux ans avec les plus "jeunes" du département : Bruno, Garry et Harimisa, merci pour votre dynamisme et votre ouverture.

Enfin, mes remerciements les plus chaleureux vont à Jérôme. Mes mots seront succincts et empruntés à mon romancier préféré : *"Il suffit d'un instant. Un regard. Une rencontre."* Merci.

## Avant-propos

L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES diffère d'une thèse de doctorat dans le sens où elle ne tente pas de développer un sujet précis. Elle est plutôt l'occasion de dresser un bilan du parcours scientifique en mettant en avant la cohérence de l'ensemble des travaux et la diversité des méthodes utilisées. C'est aussi l'occasion de lister et présenter les futurs projets scientifiques.

Mon parcours et mes travaux ont deux particularités qu'il convient de noter ici. Tout d'abord, la question de l'insularité occupe une grande place dans mes travaux. J'aborde de nombreuses questions autour des différents champs de la transition énergétique en considérant différentes échelles, mais le point de convergence de l'ensemble de mes travaux reste le milieu insulaire.

Ensuite, mes approches sont pluridisciplinaires. Qu'il s'agisse de mesurer la vulnérabilité d'un territoire ou d'analyser l'efficacité d'une politique publique, mon approche tente toujours de considérer chaque phénomène étudié dans sa globalité et transdisciplinarité.

Ce mémoire d'HDR est un exposé synthétique de mon parcours scientifique depuis ma thèse à l'Université de la Réunion, au sein du laboratoire PIMENT en 2012. Il s'organise en deux parties :

- une première partie détaillant mon parcours académique et scientifique au sein de l'Université de La Réunion. Composée de 3 chapitres, cette partie inclut, tout d'abord, mon curriculum vitae détaillé, puis une présentation de mes activités pédagogiques et administratives et enfin une présentation de mes activités d'animation scientifique.
- et une seconde partie développant mes travaux scientifiques autour de la *Transition énergétique* et des *dynamiques territoriales* en milieu insulaire. Composée de 3 chapitres, cette partie relate d'abord mes travaux de thèse, puis détaille en deux grands chapitres mes deux grands champs de recherche : la vulnérabilité énergétique des territoires, notamment insulaire, et l'application et l'implication des politiques en matière de transition énergétique sur les territoires insulaires.

# Table des matières

<b>Liste d'abréviations</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiii</b>
<b>I Parcours Académique et Scientifique</b>	<b>1</b>
<b>1 Parcours et Curriculum vitae détaillé</b>	<b>3</b>
1.1 Parcours . . . . .	4
1.2 Curriculum Vitae . . . . .	5
<b>2 Détail des activités pédagogiques et collectives</b>	<b>13</b>
2.1 Engagement pédagogique . . . . .	14
2.1.1 Activités d'enseignement . . . . .	14
2.1.2 Responsabilités pédagogiques . . . . .	17
2.1.2.1 Responsable de la 1 <sup>re</sup> année de Licence Génie Civil .	18
2.1.2.2 Responsable du Master VEU . . . . .	18
2.1.2.3 Encadrement de stages . . . . .	19
2.1.3 Responsable scientifique de la filière urbanisme dans le dé- partement des Sciences du Bâtiment et de l'Environnement .	19
2.1.4 Engagement dans les nouvelles méthodes d'apprentissage . .	20
2.1.5 Promotion de la formation . . . . .	21
2.2 Engagement administratif et collectif . . . . .	23
2.2.1 Directrice du département de formation des Sciences du Bâ- timent et de l'Environnement . . . . .	23
2.2.2 Vice-Doyenne Formation et Insertion professionnelle au sein de l'UFR SHE . . . . .	25
2.2.3 Responsabilités au sein de l'Université. . . . .	26
2.2.3.1 Conseils centraux et conseil de composante . . . . .	26
2.2.3.2 Divers . . . . .	26
2.2.3.3 Engagement collectif dans les activités de recrute- ments de l'UR . . . . .	27
2.2.4 Rayonnement de l'Université . . . . .	28
2.3 Synthèse . . . . .	31

<b>3</b>	<b>Détail de mes activités d'animation scientifique</b>	<b>33</b>
3.1	Animation scientifique interne et externe . . . . .	34
3.1.1	Participation à des projets de recherche . . . . .	34
3.1.2	Organisation de conférences et tables rondes . . . . .	35
3.2	Encadrement de travaux de recherche . . . . .	37
3.2.1	Direction et encadrement de thèses . . . . .	37
3.2.2	Participation aux comités de thèses . . . . .	39
3.3	Production scientifique . . . . .	40
3.3.1	Revue internationale avec comité de lecture . . . . .	40
3.3.2	Conférences avec comité de lecture . . . . .	40
3.3.3	Symposiums . . . . .	42
<b>II</b>	<b>Synthèse des activités de recherche</b>	<b>43</b>
	<b>Introduction générale</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>L'étude des formes urbaines en milieu insulaire : l'interaction transport et organisation urbaine</b>	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	52
4.2	Analyse des hiérarchies urbaines . . . . .	53
4.3	Analyse de la structure spatiale . . . . .	54
4.4	La densité, outil d'analyse de la forme urbaine . . . . .	56
4.5	L'interaction forme urbaine et transport et scénarios de prévision . . . . .	59
4.6	Conclusion du chapitre . . . . .	61
<b>5</b>	<b>La transition énergétique : vulnérabilité et résilience</b>	<b>63</b>
5.1	Cadrage théorique : la vulnérabilité énergétique . . . . .	65
5.1.1	Le concept de vulnérabilité . . . . .	65
5.1.2	Le concept de résilience . . . . .	67
5.1.3	Les concepts de soutenabilité et d'inégalité . . . . .	69
5.2	Création de bases de données et sélection de variables . . . . .	70
5.2.1	La vulnérabilité énergétique des espaces insulaires : les spécificités . . . . .	71
5.2.2	Une vision internationale de la vulnérabilité énergétique : une analyse de soutenabilité . . . . .	73
5.2.3	La donnée : agrégation et construction de bases . . . . .	74
5.3	La création d'indicateurs de mesure de la vulnérabilité énergétique par analyse factorielle . . . . .	75
5.3.1	La création d'indicateurs de mesure . . . . .	76
5.3.2	Analyses factorielles et clustering . . . . .	78

---

5.3.3	La mesure de la vulnérabilité énergétique : création d'un indicateur composite . . . . .	80
5.4	La création d'indicateurs dynamiques par analogie aux sciences physiques . . . . .	86
5.4.1	L'analogie à l'énergie cinétique . . . . .	87
5.4.2	L'espace des phases . . . . .	94
5.5	Conclusions préliminaires et projets de développement . . . . .	100
5.6	Travaux de référence de cette partie . . . . .	103
<b>6</b>	<b>La transition énergétique : politiques territoriales en milieu insulaire</b>	<b>105</b>
6.1	Les milieux insulaires face à la transition énergétique : diagnostic territorial . . . . .	107
6.1.1	Le milieu insulaire, un milieu spécifique . . . . .	107
6.1.2	Évaluation des besoins du territoire : les déterminants de la consommation énergétique à l'échelle communale . . . . .	112
6.1.3	Estimation de la demande énergétique : ratios de consommation à l'échelle du bâtiment . . . . .	115
6.1.4	Transport durable : diagnostic pour une mobilité vertueuse . . . . .	119
6.1.5	Synthèse . . . . .	127
6.2	Évaluation des politiques publiques en matière de transition énergétique : analyse du cas de l'île La Réunion . . . . .	128
6.2.1	La planification énergétique . . . . .	128
6.2.2	La mesure des effets des politiques de transition énergétique sur les ménages . . . . .	133
6.2.3	Les projets d'aménagements durables, outils de la transition énergétique . . . . .	138
6.2.4	La gestion durable des déchets plastiques . . . . .	141
6.3	Conclusions du chapitre et projets de développement . . . . .	147
6.4	Travaux de référence de cette partie . . . . .	150
	<b>Conclusion générale</b>	<b>153</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>155</b>



# Liste d'abréviations

ACP	Analyses en Composantes Principales
ATER	Attachée temporaire d'enseignement et de recherche
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CAPTAIN	Communauté d'ApPrenTissage Actif et INteractif
CM	Cours Magistral
CSR	Combustible Solide de Récupération
DE	Droit Economie
DTPI	Direction Technique du Patrimoine Immobilier
EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
GC	Génie Civil
GCEE	Génie Civil Energie et Environnement
EBENE	Espaces Batis ENergie et Environnement
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IRIS	Îlots Regroupés pour l'Information Statistique
ITRF	Ingénieurs et personnels Techniques, de Recherche et de Formation
JPO	Journées Portes Ouvertes
NOF	Nouvelle Offre de Formation
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial
PIMENT	Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie et l'environnemeNT
PLU	Plan Local d'Urbanisme
RISE	Regulatory Indicators for Sustainable Energy
SBE	Sciences du Bâtiment et de l'Environnement
SHE	Sciences de l'Homme et de l'Environnement
SHS	Sciences Humaines et Sociales
SIG	Système d'Information Géographique
STP	Structures et Travaux Publics
TD	Travaux Dirigés
TP	Travaux Pratiques
UFR	Unité de Formation et de Recherche
UTEE	Urbanisme, Transition Energétique et Environnement



# Table des figures

2.1	Extrait de présentation - opération Immersion des lycéens . . . . .	22
2.2	Actions de communication - JPO . . . . .	22
2.3	Extrait de présentation - Forum des métiers dans un collège . . . . .	23
2.4	Plaquette Enquête insertion professionnelle - Exemple du master Génie Civil . . . . .	26
2.5	Présentation de mon métier devant des lycéennes. Lycée Roland Garros. 2016 . . . . .	29
2.6	Invitation challenge Innovatech. 2018 . . . . .	29
2.7	Lauréats de la finale régionale des 24h de l'Innovation. 2017 . . . . .	30
2.8	Extrait de ma présentation au Symposium 2021 sur l'environnement à La Réunion. 2021 . . . . .	30
2.9	Portrait - 40 femmes qui font l'Université . . . . .	31
3.1	Colloque TransEETer - Présentation et conférenciers - 2017 . . . . .	36
3.2	Les 17 Objectifs de Développement Durable définis par les Nations Unies . . . . .	46
3.3	Cadre du travail . . . . .	48
4.1	Relief de l'Île de La Réunion [Bénard 2012] . . . . .	52
4.2	Autocorrélation spatiale 1990-1998-2008 [Bénard 2012] . . . . .	55
4.3	Indice d'étalement - Représentation cartographique des 3 principales aires urbaines de l'Île de La Réunion [Bénard 2012] . . . . .	57
4.4	Simulation : Population cumulée - Aire urbaine de Saint-Denis 2030 [Bénard 2012] . . . . .	60
4.5	Densités prévisionnelles - aires urbaines de Saint-Denis en 2030 [Bénard 2012] . . . . .	61
5.1	Le concept de vulnérabilité . . . . .	66
5.2	Schématisation du concept de résilience et de vulnérabilité . . . . .	68
5.3	Schématisation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire insulaire : décomposition du concept . . . . .	73
5.4	Création d'un indicateur composite : protocole de travail . . . . .	77
5.5	Représentation et interprétation de l'indice IVEN . . . . .	82
5.6	Résultats ACP - from <i>Utilities Policy</i> . . . . .	84
5.7	Résultats ACP - from <i>Utilities Policy</i> . . . . .	84
5.8	Résultats de l'indicateur SI (2000 et 2015) - Pays de L'UE . . . . .	86
5.9	Cercles de corrélations des dimensions 1-2 (a) et 3-4(b) . . . . .	89
5.10	Clustering représenté sur les dimensions 1-2 (a) et 3-4(b) . . . . .	90

5.11	Carte mondiale : score de l'indicateur RISE en 2019 . . . . .	91
5.12	Score de l'indicateur RISE (a) . . . . .	92
5.13	Score de l'indicateur RISE (b) . . . . .	92
5.14	La résilience des territoires - méthode Energie cinétique - Résultats .	93
5.15	Résultats de l'ACP - Cercles de corrélation . . . . .	97
5.16	Indicateur composite calculé - Evolution 1994-2014 . . . . .	98
5.17	Représentation des trajectoires de pays dans l'espace des phases : densité de points . . . . .	99
6.1	Carte de l'Île de La Réunion : un relief contraint, une urbanisation limitée [Bénard-Sora 2016] . . . . .	113
6.2	Résultats de l'analyse bivariée : régression linéaire . . . . .	114
6.3	Résultat final : trois profils de consommation d'électricité . . . . .	115
6.4	Méthodologie - Calcul de ratio de consommation d'électricité par ty- pologie de surface bâtie . . . . .	117
6.5	Ratios de consommation d'électricité par typologie de surface bâtie .	118
6.6	Répartition spatiale des différents types de consommateurs . . . . .	119
6.7	Choix des variables . . . . .	122
6.8	Cercle de corrélation - Analyse factorielle . . . . .	122
6.9	Clustering - Analyse Ile de La Réunion . . . . .	124
6.10	Habitudes de déplacement sur le périmètre d'étude. Source : données du RGP INSEE, 2015 . . . . .	125
6.11	Représentation des stations potentielles Lotola confrontées aux cibles potentielles . . . . .	126
6.12	Lotola - résultats de l'analyse multivariée . . . . .	127
6.13	Documents prescrits par la loi et documents en vigueur en 2018. Une analyse des documents de planification énergétique et d'urbanisme .	132
6.14	Mix électrique réunionnais - 2019. Source Don- nées :[Observatoire Energie Reunion 2020] . . . . .	135
6.15	Revenu minimal à percevoir selon la composition familiale . . . . .	137
6.16	Représentations spatiales des vulnérabilités sociales : simulation avant/après la transition tout électrique . . . . .	137
6.17	Cartographie des indicateurs locaux d'association spatiale de l'indice composite . . . . .	141
6.18	Scénarios analysés - synthèse . . . . .	145
6.19	Résultats de l'étude . . . . .	146

# Liste des tableaux

2.1	Enseignements du module Espaces durables. . . . .	15
2.2	Enseignements du module Analyse statistique et spatiale. . . . .	16
2.3	Enseignements du module Vulnérabilités des territoires. . . . .	16
2.4	Enseignements du module Transport et mobilités. . . . .	17
2.5	Enseignements Méthodologie . . . . .	17
3.1	Tables rondes - TransEETer, 2017 . . . . .	36
4.1	Coefficients de hiérarchisation . . . . .	53
5.1	Schématisation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire insulaire : vision Forces/Faiblesses/Besoins . . . . .	72
5.2	Décomposition du concept de vulnérabilité énergétique sous le prisme du développement durable . . . . .	74
5.3	Valeurs propres et pourcentage d'inertie . . . . .	81
5.4	Contribution des variables . . . . .	82
5.5	Variables utilisées pour l'ACP. Source = Banque mondiale . . . . .	88
5.6	Tableau des valeurs propres . . . . .	88
5.7	Variables utilisées pour l'ACP. Source = Banque mondiale . . . . .	97
6.1	Résultats LOTOLA - Clients potentiels . . . . .	125
6.2	Identification des variables - Analyse multivariée - Projet LOTOLA . . . . .	126
6.3	Analyse de 5 lois françaises sur l'Energie [2005-2015] . . . . .	129
6.4	Indicateurs . . . . .	145



**Première partie**

**Parcours Académique et  
Scientifique**

## **Deuxième partie**

### **Synthèse des activités de recherche**



# Introduction générale

**L**E système économique planétaire actuel est basé sur l'énergie : capital et travail sont alimentés et dépendent, parfois même intégralement, de l'énergie. L'humanité s'apprête, cependant, à entrer dans un nouveau paradigme énergétique. Chaque paradigme énergétique a été causé par l'ajout d'une source abondante d'énergie venant se greffer aux énergies existantes. Le premier paradigme, associé à la première révolution industrielle, a pris forme grâce à l'exploitation du charbon à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'usage massif d'un pétrole abondant a donné lieu au second paradigme énergétique aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles et, enfin, l'électricité, sa démocratisation et sa diffusion, ont causé le troisième paradigme au XX<sup>e</sup> siècle en permettant ainsi de diversifier les sources primaires d'énergie utilisées (charbon, pétrole, gaz, énergie hydraulique, énergie nucléaire, etc). Dans le nouveau paradigme énergétique attendu, il ne s'agit pas, cette fois, d'une nouvelle énergie abondante qui vient se greffer aux énergies existantes. Il s'agit plutôt d'un "déficit" d'énergie puisque l'enjeu du XXI<sup>e</sup> siècle est la lutte contre le réchauffement climatique et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour y arriver, deux principales solutions sont avancées : produire une énergie plus propre ou consommer plus sobrement. Agir sur la consommation implique de nombreuses opportunités de changements. Cela peut passer par la construction de bâtiment plus économe en énergie, déléguant ainsi l'effort de sobriété au bâtiment plutôt qu'à l'homme. Dans le même esprit, l'utilisation de véhicules moins consommateurs et polluants permet une réduction du besoin énergétique sans modifier le comportement des usagers. Néanmoins, les actions en faveur d'une sobriété énergétique doivent également passer par la modification des comportements de consommation. En associant la question de la transition énergétique à la réalité de la croissance démographique, il apparaît primordial d'agir à la fois sur l'offre et sur la demande énergétique. La transition énergétique doit donc être abordée dans des dimensions variées, complexifiant ainsi la prise en compte des enjeux énergétiques pour les territoires.

## **La transition énergétique, une préoccupation d'ordre mondial**

Les enjeux mondiaux du développement durable et de la transition énergétique ont été définis dans les Objectifs de Développement Durable (ODD) qui balaisent de manière large les grandes problématiques d'envergure mondiale auxquelles nos sociétés du XXI<sup>e</sup> siècle sont confrontées (Figure 3.2).



FIGURE 3.2 – Les 17 Objectifs de Développement Durable définis par les Nations Unies

Alors que l'énergie constitue la cible n° 7 *Énergie Propre et d'un coût abordable*, on peut lui retrouver des liens avec chacun des autres objectifs, tant sa transversalité la place aujourd'hui au centre de nos sociétés modernes. Ainsi, associé à l'objectif n°1 par exemple, on peut retrouver la notion de précarité énergétique. Il en va de même pour promouvoir les villes et communautés durables, une consommation responsable ou encore protéger la planète. Chaque ODD est lié de près ou de loin à la question de l'énergie. L'ensemble de ces problématiques sont d'envergures mondiales, mais connaissent des échos locaux plus ou moins importants. Chaque territoire de la planète doit ainsi se saisir de la question du développement durable de la planète, mais chacun avec ses spécificités.

### **Le milieu insulaire, des territoires spécifiques**

Les territoires insulaires sont répartis partout sur la planète. De superficies différentes et de situations politiques et économiques différentes, ces territoires se retrouvent aujourd'hui confrontés de manière brutale aux conséquences du réchauffement climatique. Parmi ces territoires, on retrouve les Petits États Insulaires en Développement (PEID), territoires isolés aux économies fragiles [Angeon 2008, Bouchard 2010]. Ces territoires présentent de nombreux défis économiques en raison de leur petite taille, de leur dispersion géographique et de leur éloignement des marchés [Jacquemot 2021]). Depuis les années 1970, ils ont été progressivement reconnus sur la scène internationale comme des territoires particulièrement vulnérables et nécessitant une attention particulière [Angeon 2008, Bouchard 2010, Angeon 2015, Bénard-Sora 2017]. En plus de leur fragilité, ces territoires sont riches d'une biodiversité exceptionnelle (ils détiennent une part très élevée de la biodiversité de la planète), et d'une population aux cultures riches et variées qui contribuent au rayonnement de ces territoires [Jacquemot 2021]). En 1972, la recommandation 99 de la déclaration de Stockholm de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement reconnaît le besoin de protection des îles face aux conséquences du réchauffement climatique [Nations Unies 1973].

Ces territoires sont uniques tant sur le plan de l'environnement que du développement [Jacquemot 2021], et la question du réchauffement climatique et de ses conséquences exerce

---

une pression importante sur eux. En 1992, à Rio, les Nations unies ont mentionné " *un cas particulier pour l'environnement et le développement* " [Nations Unies 1992]. Leur importance sur la scène mondiale dans un contexte d'épuisement des ressources et de réchauffement climatique a été rappelée dans le programme de la Barbade (BPoA) en 1994 : le programme a mis en avant un certain nombre de priorités et d'actions à mener dans ces territoires, notamment sur la question énergétique [Nations Unies 1994]. Forts de ces considérations, ils disposent aujourd'hui de leurs propres sommets.

Les progrès réalisés sur les territoires insulaires sont régulièrement examinés et évalués afin de mettre en exergue les principales mesures à mettre en œuvre sur ces territoires. Ainsi, l'Énergie est systématiquement mise en avant comme étant une problématique prépondérante pour le développement de ces territoires [Nations Unies 1999, Nations Unies 2002, Nations Unies 2005]. Chaque sommet et réunion organisée pour les petits territoires insulaires est l'occasion de la réalisation d'un bilan et d'un réengagement de la communauté internationale qui reconnaissent les PEID comme des zones vulnérables et stratégiques pour la mise en œuvre du développement durable. Sur le plan énergétique, l'enjeu pour les PEID et tous les territoires insulaires réside dans un accès fiable, durable, moderne et à un coût abordable à l'énergie. Ces territoires doivent continuer leurs efforts en matière de pénétration des énergies renouvelables dans leur réseau et limiter leurs importations de ressources énergétiques [Nations Unies 2019].

### **Positionnement de mes travaux**

Ce mémoire d'HDR s'intitule "Transition énergétique et dynamiques territoriales" et s'inscrit en Aménagement de l'espace, urbanisme. Pluridisciplinaire dans son essence même, ce travail s'appuie sur différentes disciplines dans une démarche d'évaluation des réalités territoriales, notamment insulaires, face à la transition énergétique. Le milieu insulaire est le milieu d'analyse privilégié de mes travaux. Dès la thèse, mon travail sur l'île de La Réunion a consisté en une analyse de la relation entre organisation urbaine et système de transport à travers des modèles d'analyse variés, généralement appliqués à plus grande échelle (Chapitre 4). Cette démarche d'appropriation de modèles et d'adaptation est un caractère visible dans l'ensemble de mes travaux sur les territoires insulaires : je mets en œuvre des méthodologies généralement appliquées à des échelles plus grandes, dans des disciplines différentes, pour l'étude de phénomènes dans ces milieux spécifiques.

Après la thèse, je me suis orientée vers l'analyse de la question énergétique appliquée au milieu insulaire en étudiant à la fois des espaces développés et dépendant de pays riches, et des espaces plus fragiles, en développement, les PEID. Mes approches combinent des méthodologies issues de différentes disciplines dans l'objectif d'établir des diagnostics de territoires et produire des données et bases d'analyse sur le milieu insulaire en général. Afin de valider les méthodes développées grâce à des données plus vastes et robustes, j'ai parfois opéré des digressions en étendant mon analyse à l'échelle de pays, dans une dimension plus interna-

tionale. Mes travaux post-thèse s'organisent en deux grands axes :

1. Axe 1 : La transition énergétique à l'épreuve des territoires : vulnérabilité, résilience et durabilité sont des concepts clés pour appréhender les capacités territoriales.
2. Axe 2 : Politiques territoriales et capacités territoriales : comment les territoires peuvent-ils assurer la transition énergétique ?

L'objectif est d'éclairer la question de la transition énergétique dans une lecture multidimensionnelle et multi-échelles afin de pouvoir proposer des outils et diagnostics d'aide à la décision. Il s'agit d'identifier et comprendre les facteurs clés de la transition énergétique en analysant et évaluant les trajectoires de transition déjà entamées par les territoires (Figure 3.3).

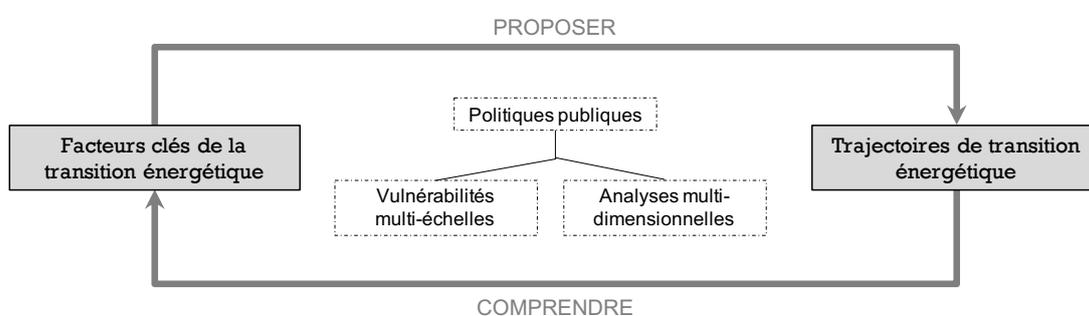


FIGURE 3.3 – Cadre du travail

Afin d'évaluer ces trajectoires de transition, trois approches sont nécessaires et constituent l'objet de mes travaux. En premier lieu, l'identification des différentes dimensions de la transition énergétique à travers une vision globale de la place de l'énergie dans la société me permet de considérer les différents champs de la transition et les conséquences d'un changement de paradigme énergétique sur le territoire.

Ensuite, ces différents champs considérés et les impacts territoriaux identifiés, mes premières problématiques de recherche développées ont porté sur la définition de la vulnérabilité énergétique des territoires et sur la production d'indicateurs de mesure de cette vulnérabilité. Le contexte scientifique s'appuie à la fois sur la géographie et la science des risques, la science des données, les sciences politiques et les sciences physiques. Dans des démarches comparatives, évolutives, statiques ou dynamiques, mes travaux ont emprunté des méthodologies aux analyses factorielles et analyses physiques afin de produire plusieurs visions de la mesure de la vulnérabilité/durabilité énergétique des territoires (Chapitre 5).

En dernier lieu, mes travaux ont porté sur la mise en œuvre des politiques publiques de transition énergétiques en milieu insulaire dans une démarche diagnostique et une démarche évaluative. L'objectif est d'évaluer la capacité des territoires à assurer la mise en œuvre des décisions en matière de transition énergétique. Les résultats de diagnostic et d'évaluation peuvent ensuite alimenter les ressources et outils d'aide à la décision disponibles en matière

de planification énergétique et de prospective territoriale. Cet axe s'appuie sur l'économie géographique et l'analyse spatiale et territoriale, la science des données, la planification et les sciences politiques. Mes travaux explorent différents champs de la transition énergétique : production, consommation, planification, projet d'aménagements durable, transport et déchets (Chapitre 6).

Cette deuxième partie de ce mémoire d'HDR, organisée en trois chapitres, propose une vue d'ensemble de mon parcours recherche en déclinant dans un premier temps mes axes de recherche liés à mes travaux de thèse (chapitre 4), puis mon parcours post-thèse structuré en deux axes présentés dans les chapitres 5 et 6) :

- La transition énergétique : vulnérabilité et résilience.
- La transition énergétique : politiques territoriales en milieu insulaire.



# L'étude des formes urbaines en milieu insulaire : l'interaction transport et organisation urbaine

---

## Sommaire

---

4.1	Introduction . . . . .	52
4.2	Analyse des hiérarchies urbaines . . . . .	53
4.3	Analyse de la structure spatiale . . . . .	54
4.4	La densité, outil d'analyse de la forme urbaine . . . . .	56
4.5	L'interaction forme urbaine et transport et scénarios de prévision	59
4.6	Conclusion du chapitre . . . . .	61

---

## 4.1 Introduction

Ce chapitre se consacre à une présentation synthétique de mes travaux de thèse. Soutenue en 2012, ma thèse porte sur l'étude des formes urbaines en milieu insulaire et de l'interaction avec le réseau de transport. En considérant comme cas d'étude le territoire réunionnais, et notamment ses trois principales aires urbaines, mes travaux ont consisté en l'application d'outils et méthodes d'analyse des formes urbaines à des échelles réduites.

L'étalement urbain et le transport sont deux problématiques prépondérantes à La Réunion. Dans un contexte de forte croissance démographique où le million démographique est prévu pour 2030, la question de l'occupation du sol est primordiale. Le relief réunionnais, difficile et escarpé (Figure 4.1), contraint l'urbanisation aux zones littorales. Presque deux tiers de l'île sont, ainsi, indisponibles à l'urbanisation.

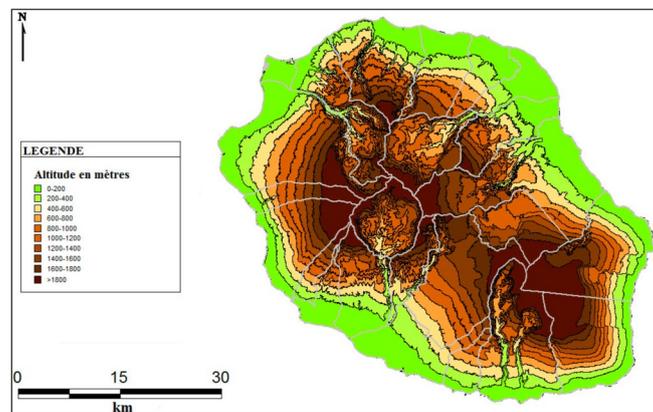


FIGURE 4.1 – Relief de l'île de La Réunion [Bénard 2012]

Dans le même temps, le réseau routier réunionnais, également limité par le relief, est déjà saturé et la problématique transport occupe une grande place dans les préoccupations en matière d'aménagement. Les travaux de thèse ont ainsi proposé de découvrir, à l'échelle des aires urbaines, les différentes formes d'étalement urbain visibles à la Réunion et s'interroger sur d'éventuelles similarités avec des territoires non limités par le relief. Mes travaux ont tenté de répondre aux questions suivantes :

1. Le milieu insulaire favorise-t-il des formes d'étalement spécifiques? Cette première question sous-tend plusieurs questionnements préliminaires : peut-on observer la présence de hiérarchies urbaines à l'échelle régionale (section 4.2) ? Existe-t-il des effets de structuration spatiale (section 4.3) ? Peut-on appliquer des modèles classiques d'organisation urbaine aux agglomérations de l'île de La Réunion (section 4.4) ?
2. Dans quelle mesure les formes d'étalement observées sur l'île sont-elles liées au réseau de transport ? À travers l'application des modèles d'organisation monocentrique et polycentrique, les notions de distance et d'accessibilité sont discutées et appréhendées à travers le réseau routier (section 4.4).
3. Quelles sont les évolutions à prévoir en matière de distribution spatiale de la population et de mobilité à La Réunion (section 4.5) ? Les prévisions de croissance démogra-

phiques sont intégrées aux modèles d'analyse des formes urbaines et, par une analyse localisée du trafic journalier sur le réseau routier, la demande de mobilité additionnelle est calculée.

## 4.2 Analyse des hiérarchies urbaines

La littérature sur l'analyse des hiérarchies urbaines est abondante et il existe de nombreux modèles d'analyse. Ce sont généralement les travaux de Zipf qui sont associés à la loi selon laquelle la population d'une ville est proportionnelle à son rang dans la hiérarchie urbaine et à la taille de la plus grande agglomération du système [Bénard 2012]. Plusieurs formes mathématiques ont, dans la littérature, permis de traduire ce phénomène. Deux d'entre elles ont été expérimentées pendant la thèse :

$$\ln(r_i - 1/2) = \ln k - \beta \ln s_i \quad (4.1)$$

Avec  $r_i$  et  $s_i$ , respectivement, le rang et la taille de la ville,  $\beta$  le coefficient de hiérarchisation et  $k$  un paramètre qui dépend de la taille de la plus grande ville. Cette relation log-linéaire, la plus répandue dans la littérature, est la plus pertinente pour l'estimation du coefficient de hiérarchisation par la méthode des moindres-carrés ordinaire [Schaffar 2009]. C'est ce coefficient qui permet d'identifier le type d'organisation urbaine en présence. Il permet, en effet, de distinguer les centres, et notamment la présence de plusieurs centres. Ainsi, lorsque  $\beta < 1$ , on est en présence d'une grande concentration : l'effet agglomération est fort et les villes de grande taille ont un poids important. À l'inverse, si  $\beta > 1$ , on est en présence d'un espace polycentrique où plusieurs centres urbains de rang plus ou moins égal coexistent [Dimou 2007].

La seconde équation propose une relation quadratique [Rosen 1980] :

$$\ln r_i = \alpha + \beta \ln s_i + \delta (\ln s_i)^2 \quad (4.2)$$

Lorsque  $\delta$  est significativement différent de 0, on s'éloigne de la loi de Pareto et lorsque  $\delta = 0$ , on obtient la loi de Zipf. Si  $\delta > 0$ , le nombre de villes moyennes est inférieur à celui préconisé par la loi de Zipf. On est alors en présence d'un effet d'agglomération très fort. Si, au contraire,  $\delta < 0$ , le système admet un nombre important de villes moyennes dont le poids démographique contrebalance celui des grandes agglomérations et des petites villes. L'analyse, pratiquée sur 3 années (1990, 1999 et 2009), a permis de faire émerger les résultats suivants :

TABLE 4.1 – Coefficients de hiérarchisation

	1990	1999	2008
<i>Coefficient modèle log-linéaire</i>			
$\beta$	0,522	0,528	0,522
<i>Coefficient modèle quadratique</i>			
$\beta$	0,789	0,985	1,025
$\delta$	-0,104	-0,118	-0,121

Les deux modèles ont ainsi permis d'établir le même constat sur l'île de La Réunion : on n'observe aucun effet d'agglomération véritablement fort, mais quelques villes moyennes se démarquent et créent une structure plutôt polycentrique. L'évolution des coefficients entre chaque année considérée n'est pas non plus très marquée, ce qui indique une certaine stabilité sur la distribution de la population dans les villes. Ainsi, en 20 ans, malgré une croissance démographique importante, le modèle de croissance urbaine de l'île de La Réunion est relativement stable avec deux caractéristiques fondamentales : un étalement urbain important et des agglomérations de petites tailles.

### 4.3 Analyse de la structure spatiale

Afin de compléter ces résultats, mes travaux ont ensuite porté sur l'analyse de la structure spatiale de l'île en cherchant à vérifier l'existence de corrélations entre les mesures géographiques de la distribution de la population. En somme, il s'agissait d'apporter une lecture spatiale de la distribution de la population sur l'île. C'est à travers une analyse d'autocorrélation spatiale que j'ai tenté d'apporter cette lecture spatiale. En combinant le calcul de l'indice I de Moran, la représentation du diagramme de Moran et le calcul des *Local Indicators of Spatial Association* (LISA), j'ai vérifié si la relative stabilité de l'évolution de la croissance urbaine et l'homogénéité constatée entre les différentes régions de l'île trouvait ses causes dans une dépendance spatiale entre les régions de l'île.

Les indices d'autocorrélation spatiale sont nés des travaux de Patrick Moran et de Roy Geary dans les années 1950, alors qu'ils cherchaient à mettre en évidence des objets corrélés spatialement [Moran 1950, Geary 1954]. Parmi l'ensemble des indices d'autocorrélation existant, le plus robuste et le plus utilisé reste le I de Moran [Cliff 1981]. Le principe de calcul du I de Moran est simple : il s'agit de comparer les valeurs d'un ensemble de points  $i$  avec celles de leurs voisins  $j$ . Cette comparaison permet la lecture d'une double proximité : une proximité spatiale et une proximité statistique [Oliveau 2010]. D'une forme proche du coefficient de corrélation (il s'agit en effet d'un rapport entre covariance et variance), l'indice I de Moran a pour avantage d'être facile d'interprétation [Bénard 2012]. Rapport de la covariance sur la variance, le I de Moran peut-être interprété comme la part de variance qui peut être expliquée par le voisinage. Si la valeur est proche de -1, cela indique qu'il y a un effet d'autocorrélation spatiale négative tandis qu'une valeur proche de +1 indique de l'autocorrélation spatiale positive. L'indice s'écrit généralement sous la forme suivante :

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2} \quad (4.3)$$

Où  $z_i$  représente la valeur de la variable au point  $i$  et de moyenne  $\bar{z}$ ;  $j$  sont les voisins de l'individu  $i$  observé avec  $j \neq i$ ;  $W_{ij}$  est la matrice de pondération, ou matrice de voisinage. Le diagramme de Moran permet, ensuite, une lecture rapide de la structure spatiale. Il s'agit de la représentation graphique d'un nuage de points dont les coordonnées sont la variable étudiée, centrée réduite, en abscisses et la moyenne de cette variable pour les régions voisines en ordonnée. On obtient alors quatre quadrants définissant quatre types de relations entre

régions étudiées permettant d'identifier des autocorrélations positives ou négatives, fortes ou faibles.

Enfin, pour traduire les effets de regroupements locaux et obtenir ainsi des indices locaux, Luc Anselin introduit en 1995 les LISA [Anselin 1995]. Le principe de calcul repose sur l'indice I de Moran :

$$I = \frac{(n - 1)(z_i - \bar{z}) \sum_j w_{ij}(z_j - \bar{z})}{\sum_j (z_j - \bar{z})^2} \quad (4.4)$$

Les résultats obtenus sur ces trois analyses d'autocorrélation spatiale permet d'affirmer qu'il y a en effet de l'autocorrélation spatiale présente sur l'île, mais de type low-low ce qui signifie des valeurs faibles généralisées à l'ensemble du territoire. L'homogénéité du territoire est ainsi confirmée avec un étalement urbain fort et une densité faible partout sur l'île avec l'émergence néanmoins de trois pôles de densité visibles sur les cartes de la figure 4.2 : dans la zone Nord à Saint-Denis, dans la zone Ouest au Port et dans la zone Sud à Saint-Pierre.

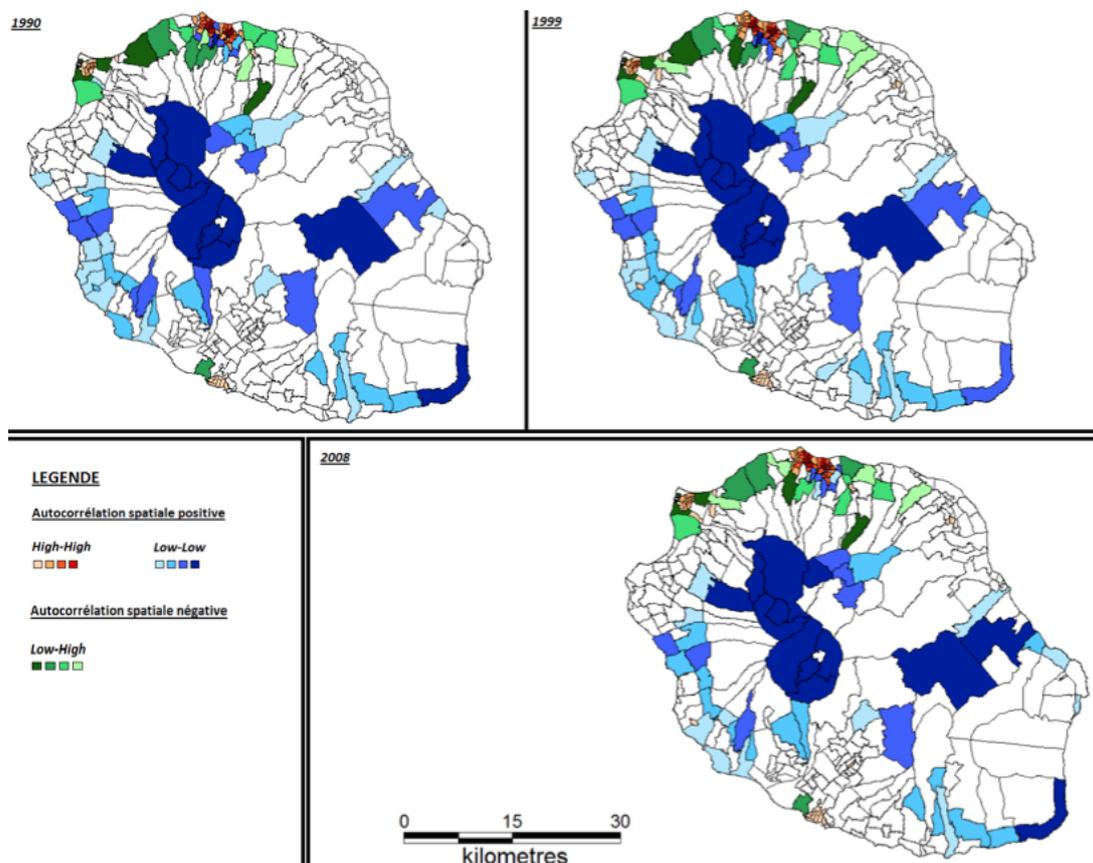


FIGURE 4.2 – Autocorrélation spatiale 1990-1998-2008 [Bénard 2012]

## 4.4 La densité, outil d'analyse de la forme urbaine

La densité constitue un aspect physique de la forme urbaine. Souvent connotée de façon négative par la population et réduite à une simple opposition entre habitat collectif et habitat individuel [Goze 2002], la densité est un indicateur simple décrivant un rapport entre un élément quantifiable et la surface d'un espace de référence. Associée à la distance au centre, la densité est un bon indicateur de la forme urbaine et a donné lieu à de nombreuses études permettant de mettre en exergue différentes morphologies fonctionnelles [Bénard 2012]. C'est à travers l'étude des trois principales aires urbaines de La Réunion en 1990, 1999 et 2008 que mes travaux ont exploré cette relation densité/distance afin d'identifier des formes d'organisation spatiale spécifique.

À travers le calcul de l'indice d'étalement formulé par Lopez et Hynes [Lopez 2003], nous confirmons une tendance forte à l'étalement urbain sur l'ensemble de l'île, vérifiée dans les trois aires urbaines et plus marquée dans l'une d'entre elles : celles de Saint-Pierre/Le Tampon. Le calcul fonctionne à partir d'un classement des unités d'études en fonction de la densité, distinguant ainsi les zones de haute densité ( $>3500 \text{ hab}/\text{km}^2$ ), les zones de basse densité (entre 200 et  $3500 \text{ hab}/\text{km}^2$ ) et excluant les zones en dessous de  $200 \text{ hab}/\text{km}^2$  considérées comme non urbaines. Le calcul de l'indice d'étalement se présente ensuite sous la forme :

$$IE = \left( \frac{b - h}{100} + 1 \right) * 50 \quad (4.5)$$

avec  $b$  le pourcentage d'unités à basse densité et  $h$  le pourcentage d'unités à haute densité. L'indice varie de 0 à 100, du moins étalé au plus étalé. L'application de l'indice  $IE$  sur La Réunion vient confirmer un étalement important sur l'ensemble de l'île avec un indice qui varie de 70,20 en 1990 à 68,03 en 2008. On constate une petite baisse de l'indice (moins 2 points) en 18 ans, ce qui pourrait indiquer une baisse de vitesse (qui reste tout de même très faible) du phénomène d'étalement. En effet, les années 1990 et 2008 sont marquées par une volonté politique de limiter l'étalement urbain et le Schéma d'Aménagement Régional (SAR) de 1995 a donné le ton en exprimant une volonté d'aménagement plus équilibré sur l'ensemble du territoire avec la mise en place d'une obligation de densification des agglomérations existantes et de structuration des bourgs ruraux [Réunion 2011]. Néanmoins, les résultats de l'indice de Lopez et Hynes ne nous permettent pas d'établir un diagnostic spatial d'étalement urbain sur le territoire. Aspatial dans sa construction, l'indice ne permet pas de rendre compte de la variation sur le territoire et doit donc être complété par une analyse plus fine.

Une analyse par aire urbaine de l'indice permet, ensuite, de mettre en évidence deux éléments : le premier concerne une perte de vitesse constatée de l'indice d'étalement entre 1990 et 2008, ce qui confirme le chiffre pour l'étude globale de l'île et les efforts réalisés grâce au SAR; le second concerne l'étalement plus contenu dans l'aire urbaine de Saint-Denis (avec des indices proches de 50) que dans les deux autres aires urbaines (avec des indices proches des 75) (Figure 4.3). Ce fait peut s'expliquer par deux choses : un relief plus contraint pour l'aire urbaine de Saint-Denis, d'une part, et, d'autre part, des possibilités d'étalement plus grandes pour les aires urbaines de l'Ouest et du Sud, initialement moins peuplées.

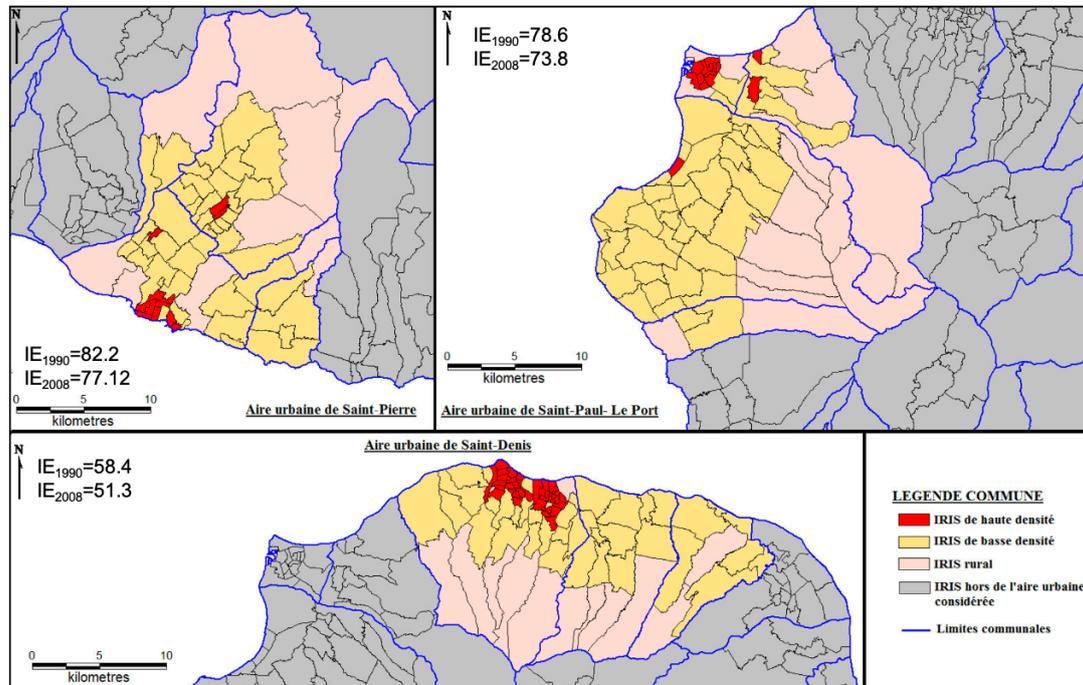


FIGURE 4.3 – Indice d'étalement - Représentation cartographique des 3 principales aires urbaines de l'île de La Réunion [Bénard 2012]

Après l'analyse d'étalement global, les travaux ont ensuite tenté de répondre à une problématique : les aires urbaines de l'île de La Réunion épousent-elles une forme monocentrique ou polycentrique ? C'est par l'application du modèle d'analyse de Bussière [Bussière 1972] que mes travaux ont tenté de répondre à cette question. Dans ce modèle, la ville est organisée autour d'un centre unique concentrant tous les emplois et une grande partie des services et des commerces. Autour de ce centre unique, l'espace et les activités s'organisent en fonction de l'éloignement au centre. L'analyse de la surface est alors réduite à la variable distance [Mignot 2007]. À cette première hypothèse doit s'ajouter l'homogénéité, la continuité et l'isotropie spatiale. L'espace est alors considéré comme uniforme. La localisation résidentielle est possible en tout point et il n'existe aucun lieu qui ne soit inaccessible, la continuité spatiale étant valable à la fois pour le relief, les infrastructures routières et les institutions. Enfin, l'isotropie de l'espace suppose que les coûts de transport sont fonction uniquement de la distance, on a alors affaire à une ville circulaire ou les temps d'accès sont identiques quelle que soit la direction empruntée [Enault 2003]. La formulation mathématique utilisée (celle de Bonnafous et Tabourin [Bonnafous 1996]) est la suivante :

$$P(x) = \frac{2A\Pi}{b^2} [1 - (1 + bx) \exp -bx] + Kx \quad (4.6)$$

Avec  $P(x)$  la population cumulée à une distance  $x$  du centre,  $A$  est la densité au centre,  $b$  est le gradient de densité, et  $K$  un paramètre représentant le niveau d'équipement en in-

frastructures de transport. Afin de tester l'hypothèse polycentrique et de définir le type de polycentrisme (complémentarité, substituabilité, ou hiérarchie) les tests suivants ont été réalisés :

- En cas de relation de complémentarité :

$$D_i = \prod_{j=1}^N f_j(d_{i,j}) \quad (4.7)$$

avec  $D_i$  la densité à la  $i^e$  unité spatiale,  $j$  l'indice repérant les centres et  $j$  l'indice des unités spatiales,  $d$  la distance entre le centre  $j$  et l'unité  $i$  et  $f_j(d_{i,j})$  la fonction de densité individuelle.

- En cas de relation de substituabilité :

$$D_i = \max_{j=1}^N f_j(d_{i,j}) \quad (4.8)$$

- En cas de relation hiérarchique :

$$D_i = \sum_{j=1}^N f_j(d_{i,j}) \quad (4.9)$$

Les résultats ont permis de faire émerger trois structurations différentes dans les aires urbaines étudiées. Ainsi, l'aire urbaine de Saint-Denis par exemple, présente une organisation radiocentrique répondant au modèle de Bussière. Les temps d'accès au centre permettent d'expliquer la répartition de la population sur le territoire. L'aire urbaine de Saint-Paul-Le Port s'organise également autour d'un centre unique, mais c'est bien plus le réseau routier qui va structurer l'organisation spatiale de la population. Nous observons ainsi un développement linéaire autour d'un axe de transport : c'est une organisation urbaine familiale, héritée de l'époque médiévale et du colonialisme. Imaginée par *Arturo Soria y Mata*, la ville linéaire s'organise autour d'un axe de transport principal, avec des îlots orthogonaux de part et d'autre de l'axe répartis à intervalles réguliers, et rassemblant l'ensemble des fonctions urbaines [Laterrasse 2018]. Cette organisation, imaginée initialement pour la ville de Madrid et son réseau de transport ferré, s'est retrouvée à La Réunion du fait du relief, d'une part, contraignant l'urbanisation aux zones littorales et, d'autre part, de l'urbanisation à proximité des ports pour le besoin de communication avec l'extérieur et le transport de marchandises. L'organisation spécifique de l'aire urbaine de Saint-Paul ne permet pas au modèle de Bussière d'être performant et c'est à travers une double régression linéaire par typologie d'espace (centre et couronne périphérique) que la monocentricité de l'aire urbaine de Saint-Paul/Le Port a été le mieux traduite. Enfin, l'aire urbaine de Saint-Pierre est le cas le plus complexe à étudier : en effet, un bâti parsemé, favorisé par un réseau de transport « en étoile », laisse présager une configuration polycentrique. Mais en 2008, les centres secondaires n'ont pas pris assez de poids pour faire face à l'attraction du centre principal. L'aire urbaine de Saint-Pierre présente donc une organisation polycentrique en devenir.

Mes travaux ont donc permis d'identifier trois aires urbaines distinctes représentées par trois modèles d'organisation urbaine différents sur un petit espace de 2 512  $km^2$  et caractérisé par une relation spécifique au réseau de transport.

## **4.5 L'interaction forme urbaine et transport et scénarios de prévision**

La relation entre transport et étalement urbain est mise en exergue à travers les exemples des trois principales aires urbaines de l'Île : Saint-Denis, Saint-Paul- Le Port et Saint-Pierre. La configuration de chaque aire urbaine est spécifique et chacune d'entre elle possède sa propre relation au transport. Ainsi, pour l'aire urbaine de Saint-Denis, ce sont les temps d'accès au centre qui structurent l'organisation spatiale. Limitée par son relief et soumise à une forte pression démographique, l'aire urbaine devra progresser verticalement et non horizontalement. Les simulations réalisées ont permis de mettre en exergue un rayon de 35 km autour du centre, à l'intérieur duquel la population additionnelle devra s'installer. Pour l'aire urbaine de Saint-Paul/Le Port, la structuration urbaine se fait à travers le réseau routier : ainsi la dichotomie existante en 2008 (avant la route des Tamarins) conduit à une croissance urbaine à deux temps représentée par une double régression linéaire. Dans le cadre de l'aire urbaine de Saint-Pierre/Le Tampon, le maillage routier a conduit à un étalement urbain en étoile semblant faire émerger des centres secondaires en 2008.

Afin de représenter cette relation au transport et envisager l'évolution de la croissance urbaine et des flux de déplacements générés, nous avons tenté quelques simulations d'évolutions de chaque aire urbaine. Pour chacune d'entre elles, nous avons imaginé deux scénarios : un scénario d'évolution constante reprenant les tendances constatées sur les années étudiées dans les précédents calculs (1990, 1999 et 2008) et un scénario propre à chaque territoire (densification du centre pour Saint-Denis, linéarité continue pour Saint-Paul-Le Port et polycentricité pour Saint-Pierre).

Pour la mise en place des scénarios, la première étape a consisté au calcul de la part de la population de chaque aire urbaine en 2030, en considérant l'évolution globale de la population en 2030. Ensuite, afin de répartir la population additionnelle selon leur part au sein de chaque aire urbaine, les courbes de populations cumulées et de densité calculées à partir du modèle de Bussière ont permis de répartir la population selon la distance au centre (Figure 4.4) et de la répartir spatialement. Pour l'aire urbaine de Saint-Denis, cette répartition de la population en 2030 est représentée dans la carte de la figure 4.5. La carte permet d'identifier les zones dont la densité sera plus élevée ou moins élevée.

Enfin, considérant le trafic journalier, la part d'actifs occupés se déplaçant en voiture particulière et le réseau routier, nous avons estimé l'augmentation journalière du flux de trafic à destination du centre de l'aire urbaine de Saint-Denis : le flux dans la zone de Saint-Denis devrait augmenter de plus de 46% entre 2008 et 2030, engendrant des problématiques de congestion importantes.

Nos travaux ont montré que l'interaction transport-organisation urbaine est forte à La Réunion. Le développement des trois principales aires urbaines est en effet largement influencé par le système de transport. Les temps d'accès au centre jouent un rôle déterminant

dans la localisation de la population, et le réseau routier, lui-même, permet de distinguer plusieurs formes urbaines. Pourtant, les politiques d'aménagement n'adoptent pas toujours une réflexion globale incluant à la fois les problématiques liées à l'organisation urbaine et les problématiques liées au transport. D'ailleurs, il n'existe aucun modèle d'interaction transport-urbanisme adapté au milieu insulaire. Les questionnements liés à l'organisation urbaine et au transport sont ainsi souvent envisagés de manière séparée. La répartition des compétences territoriales portant, d'une part, le niveau régional en tant qu'autorité organisatrice de la mobilité et, d'autre part, le niveau communal en tant que qu'organisateur de la politique de la ville peut expliquer cette considération en silo. Bien que l'organisation des documents d'urbanisme instaure une hiérarchie des normes claires entre les différentes échelles d'autorités, il existe encore des incohérences entre la multitude des projets d'aménagement sur le territoire.

Mes travaux de thèse ont constitué une première analyse de l'interaction transport-organisation urbaine à La Réunion. Nous avons tenté de prévoir la répartition de la population en 2030 et d'en prévoir les conséquences éventuelles en termes de trafic. Les scénarios d'évolution laissent présager nombreux problèmes liés au transport et à l'urbanisme en 2030, notamment en termes de trafic dans l'aire urbaine de Saint-Denis par exemple. Cette analyse est néanmoins incomplète et souffre d'un défaut incontestable : les bases de données imprécises ou absentes. Ces limites identifiées dans nos travaux appellent à un dépassement futur. Nos travaux de prévision nécessitent en effet d'être renforcés par une analyse globale de la problématique transport-urbanisme à La Réunion. En effet, notre réflexion et notre méthodologie pourraient être améliorées avec la construction d'un modèle LUTI (Land Use and Transport Interaction) adapté au milieu insulaire réunionnais. Cette construction serait une démarche lourde, mais servirait à la prospective et à la planification territoriales. Les projets d'aménagement à La Réunion pourraient être envisagés dans une réflexion globale qui permettrait de réguler les problématiques d'étalement urbain et les problématiques de congestion qui existent à La Réunion.

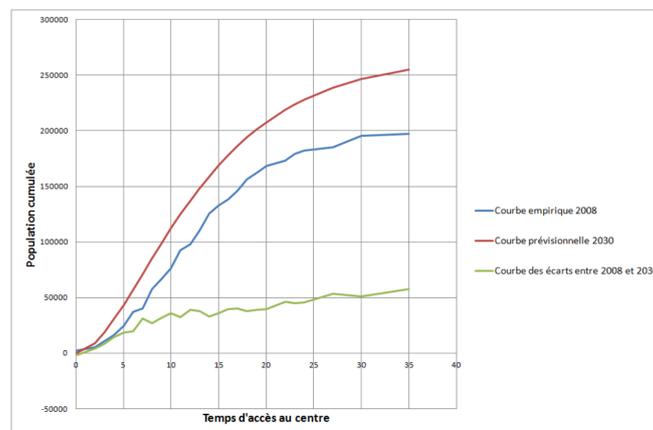


FIGURE 4.4 – Simulation : Population cumulée - Aire urbaine de Saint-Denis 2030 [Bénard 2012]

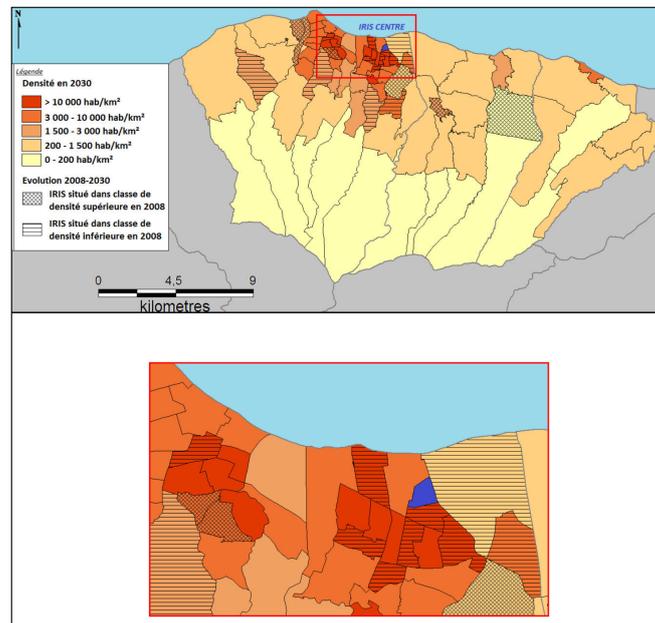


FIGURE 4.5 – Densités prévisionnelles - aires urbaines de Saint-Denis en 2030 [Bénard 2012]

## 4.6 Conclusion du chapitre

Mes travaux de thèse ont permis de vérifier l'existence, sur le territoire de l'île de La Réunion, de formes d'organisation urbaine classique, fortement corrélées aux réseaux de transport. L'application de modèles généralement utilisés sur de grandes échelles d'analyse (modèles rang-taille, autocorrélation spatiale, modèles de densité), à l'échelle fine insulaire et sur de petites aires urbaines, constitue l'originalité de mes travaux de thèse. Outre l'observation de formes urbaines classiques sur le territoire, les principales conclusions de mes travaux ont montré l'importance d'une liaison forte en amont entre transport et organisation urbaine afin de produire des territoires cohérents, moins étalés et proposant un réseau de transport adapté. Cette nécessaire mise en cohérence, qui reflète une part de vulnérabilités territoriales, prend un sens encore plus grand dans un contexte de réchauffement climatique et de nécessaire transition énergétique. Le réchauffement climatique pèse sur les territoires, les confrontant à des situations extrêmes et mettant en exergue leurs faiblesses et vulnérabilités. Pour pallier ces vulnérabilités, la transition énergétique est amenée en guise de solution. À la suite de ma thèse, mes travaux se sont tournés vers l'étude des vulnérabilités territoriales dans le contexte de la transition énergétique, notamment sur les territoires insulaires, et sur l'application des politiques en faveur de la transition énergétique.



# La transition énergétique : vulnérabilité et résilience

---

## Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Cadrage théorique : la vulnérabilité énergétique</b>	<b>65</b>
5.1.1	Le concept de vulnérabilité	65
5.1.2	Le concept de résilience	67
5.1.3	Les concepts de soutenabilité et d'inégalité	69
<b>5.2</b>	<b>Création de bases de données et sélection de variables</b>	<b>70</b>
5.2.1	La vulnérabilité énergétique des espaces insulaires : les spécificités	71
5.2.2	Une vision internationale de la vulnérabilité énergétique : une analyse de soutenabilité	73
5.2.3	La donnée : agrégation et construction de bases	74
<b>5.3</b>	<b>La création d'indicateurs de mesure de la vulnérabilité énergétique par analyse factorielle</b>	<b>75</b>
5.3.1	La création d'indicateurs de mesure	76
5.3.2	Analyses factorielles et clustering	78
5.3.3	La mesure de la vulnérabilité énergétique : création d'un indicateur composite	80
<b>5.4</b>	<b>La création d'indicateurs dynamiques par analogie aux sciences physiques</b>	<b>86</b>
5.4.1	L'analogie à l'énergie cinétique	87
5.4.2	L'espace des phases	94
<b>5.5</b>	<b>Conclusions préliminaires et projets de développement</b>	<b>100</b>
<b>5.6</b>	<b>Travaux de référence de cette partie</b>	<b>103</b>

---

Ce chapitre dresse un bilan de la première partie de mes travaux post-thèse : l'étude de la vulnérabilité énergétique des territoires, pour conduire à la durabilité.

Mes travaux apportent un éclairage sur la notion de vulnérabilité énergétique et fournissent une méthodologie d'analyse de cette vulnérabilité à travers la création d'indicateurs de mesure. La vulnérabilité est appréhendée au sens théorique (section 5.1) et sa mesure est appliquée aux territoires insulaires en premier lieu (notamment les Petits États Insulaires en Développement (PEID)) [Bénard-Sora 2017, Praene 2018], puis à l'échelle des pays de l'Europe

[Praene 2019] et internationale [Bénard 2022a]. Après avoir développé l'importance de la sélection des variables pertinentes pour la création de bases de données (section 5.2), nous présentons des approches de mesure utilisant des outils d'analyses multivariées pour la construction d'indicateurs (section 5.3), puis une vision dynamique de la mesure de la vulnérabilité énergétique à travers une démarche analogique aux sciences physiques (section 5.4).

## 5.1 Cadrage théorique : la vulnérabilité énergétique

La transition énergétique est un des enjeux phare du XXI<sup>e</sup> siècle. Indispensable à toutes activités humaines, l'énergie est devenue, au cours des deux siècles derniers, un pivot des économies des pays, un élément déterminant favorisant un essor économique ou faisant basculer dans un état de crise économique. L'utilisation massive de toutes formes d'énergie, mais surtout du pétrole, a permis aux pays de se développer à un rythme soutenu [Carbonnier 2012, Furfari 2007]. L'énergie est un moteur de croissance et constitue l'enjeu de nombreuses tensions géopolitiques et conflits armés [Carbonnier 2012]. Au niveau national, la question énergétique revêt un caractère déterminant pour la stabilité sociale du pays. Dans tous les pays du monde, du plus interventionniste au plus libéral, l'État intervient, dans le cadre de ses fonctions régaliennes, pour fixer des normes, réguler des tarifs ou encore s'assurer de la réalisation d'investissements jugés nécessaires dans le secteur [Hansen 2019]. L'énergie ne peut donc pas s'appuyer uniquement sur les forces du marché, elle doit également s'appuyer sur l'intervention de l'État. En somme, l'énergie devient presque un bien public. Quoi qu'il en soit, les énergies conditionnent fortement la vie quotidienne des agents économiques et leurs défaillances seraient « socialement insupportable » [Hansen 2019]. La question de l'énergie est donc centrale pour le développement des sociétés et territoires.

Néanmoins, ces derniers ne sont pas tous égaux face à l'urgence de la transition énergétique. Alors que le concept d'inégalités socio-spatiales au regard de la question environnementale est aujourd'hui connu [Durand 2012], le débat sur la question énergétique a, lui, moins été développé. La répartition inégale des ressources fossiles sur la planète génère des tensions géopolitiques (à l'image des chocs pétroliers ou des guerres du Golfe pour ne citer que les plus marquantes). Parallèlement, la ressource renouvelable, bien que « disponible », ne positionne pas les territoires en situation d'égalité, car leurs potentiels et situations différentes génèrent une inégalité dans l'accessibilité à la ressource. Certains territoires sont plus vulnérables que d'autres du point de vue énergétique.

### 5.1.1 Le concept de vulnérabilité

La vulnérabilité énergétique est abordée dans la littérature, mais il n'existe pas de définition commune. En revanche, les définitions de la vulnérabilité sont abondantes et renvoient à de nombreux fondements théoriques et méthodologiques propres aux disciplines mobilisant la notion [Gleyze 2007, Bénard-Sora 2017]. L'abondance des définitions permet d'y trouver des consensus : les recherches sur la vulnérabilité conduisent, en effet, de manière assez systématique aux notions de risques et d'aléas. Par exemple, en géographie, les cartes de vulnérabilité proposent des répartitions spatiales d'enjeux directement exposés à un aléa [Reghezza 2006]. Ces enjeux, qui sont directement liés à l'Homme et à son habitat, montrent clairement la relation entre la société et l'environnement à différentes échelles spatiales et temporelles [Becerra 2012]. L'analyse de la vulnérabilité passe par l'émergence de la notion de choc, de catastrophe et de dommage. La catastrophe est un signe de vulnérabilité, elle perturbe le fonctionnement normal d'un système (la société) en provoquant une urgence et une bifurcation vers un nouveau système [Leone 2006]. La société est alors caractérisée par sa capacité à répondre à ce choc perturbateur. Cette capacité se présente sous la forme

d'un seuil de dommages que la société peut supporter. Les notions de résistance et de résilience sont alors intrinsèquement liées à la notion de vulnérabilité. Analyser la vulnérabilité, c'est s'intéresser à la capacité de la société à absorber un choc. C'est la capacité à résister à ce choc, puis à en gérer les conséquences pour finalement retrouver un nouvel état stabilisé. L'objectif est de retrouver in fine un fonctionnement proche de son état initial ou simplement un nouvel état stable. Cet état est caractérisé par des indicateurs économiques, sociaux et environnementaux. C'est ce qu'on appelle la résilience [Leone 2006, Reghezza 2006]. Autour du concept de vulnérabilité s'articulent plusieurs autres concepts de chocs, catastrophes et dommages et des notions de résistance et de résilience. La figure 5.1 ci-dessous schématise ce concept.

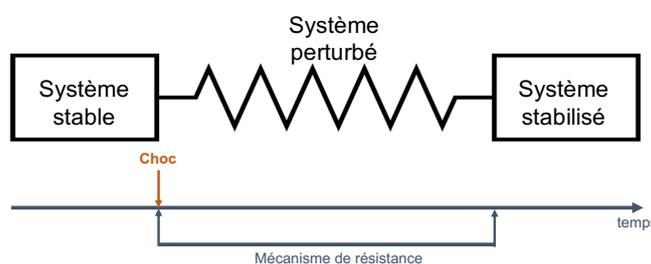


FIGURE 5.1 – Le concept de vulnérabilité

Un système est défini par des caractéristiques générales qui peuvent être soit des éléments forts, soit des éléments faibles. Ces éléments/paramètres de définition des systèmes sont des éléments structurels et fonctionnels. Ils participent à la caractérisation de la santé du système. Leur stabilité dans le temps est un indicateur de bonne santé. Leur stabilité participe également à la définition de la capacité de réaction du système. En effet, l'émergence d'un choc vient perturber le système et provoque alors une succession d'éléments perturbateurs qui vont activer le mécanisme de résistance du système. Une fois le choc absorbé, le système va revenir à un état stable qui peut ne pas être au même niveau que l'état initial. Lorsque le système est capable de revenir à un état stable, le système peut être considéré comme résilient. Lorsque le système ne parvient pas à retrouver sa stabilité, ou lorsqu'il disparaît, le système est non résilient. Dans un état post-dommage, on peut considérer que le système a évolué par son expérience du choc : il a appris de son expérience et vient alors s'ajouter à ses caractéristiques d'état l'expérience de la perturbation.

L'étude de la vulnérabilité correspond à l'association de deux paramètres d'analyse :

- les éléments vulnérables, d'une part, qui vont représenter les enjeux, les éléments sur lesquels pourront être mesurées les pertes, les endommagements par des mesures quantitatives ;
- les facteurs de vulnérabilités, d'autre part, qui vont représenter les facteurs qui influent sur la vulnérabilité globale. C'est la propension d'une société à subir des dommages.

Dans la littérature, l'analyse des facteurs de vulnérabilité se fait par une approche plutôt qualitative [D'Ercole 1994]. La vulnérabilité est un concept qui peut ainsi se rapporter aux

sciences dures et aux sciences humaines. Nous pouvons considérer que les approches de la vulnérabilité peuvent être séparées en deux catégories [Barrocca 2013]. Une première approche serait plutôt de nature sociologique : la vulnérabilité est comprise comme une propension aux dommages. Une deuxième approche serait de nature technique, où la vulnérabilité serait plutôt une mesure des dommages [D'Ercole 1994, Leone 2006]. Par exemple, pour définir la vulnérabilité, sociologues et climatologues vont s'opposer [Adger 2004]. Les sociologues vont en effet considérer la vulnérabilité comme représentant l'ensemble des facteurs socio-économiques qui déterminent la capacité des personnes à faire face au stress ou au changement [Allen 2003]. Les climatologues vont avoir une approche sensiblement différente en considérant la vulnérabilité plutôt en termes de probabilité d'occurrence et d'impacts des aléas (événements météorologiques et climatiques) [Nicholls 1999].

Lorsqu'il s'agit de caractériser un territoire tel qu'un pays, nous pouvons nous inspirer de la vulnérabilité économique pour distinguer deux autres types de vulnérabilité [Goavec 2015] :

- la vulnérabilité structurelle : c'est une vulnérabilité spécifique à l'état du système, une vulnérabilité inhérente à ses propres propriétés physiques.
- la vulnérabilité politique qui dépend d'un état non permanent et évolutif en fonction des événements politiques du pays.

La vulnérabilité structurelle est assez bien définie puisqu'il s'agit de la vulnérabilité physique et matérielle. C'est celle qui a été le plus facilement identifiée. Son analyse consiste à analyser les impacts, les caractéristiques de l'aléa (nature, intensité, fréquence) ou le degré d'exposition [Reghezza-Zitt 2016]. Appliquée au territoire, la vulnérabilité structurelle va concerner les zones directement touchées par l'aléa.

La vulnérabilité fonctionnelle du territoire va plutôt concerner les zones liées au territoire impacté et qui vont alors subir les conséquences indirectes des dommages survenus [Reghezza-Zitt 2016]. Les effets d'échelle de la vulnérabilité sont donc nombreux et le sens de la vulnérabilité peut changer selon que l'on étudie un individu, une famille, une infrastructure, un réseau ou un territoire dans son ensemble [Leone 2006]. La littérature a ainsi introduit la notion de vulnérabilité territoriale [D'Ercole 1994, Demoraes 2009, Woloszyn 2013, Reghezza-Zitt 2016]. La vulnérabilité territoriale considère le territoire comme un système complexe avec des éléments interdépendants. Ensuite, dans le système (c'est-à-dire le territoire), il existe des éléments capables de générer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble d'un territoire. Cette diffusion entraîne indirectement des conséquences qui compromettent le fonctionnement global du système, voire son développement. L'enjeu de l'analyse de la vulnérabilité territoriale consiste donc à identifier les zones fragiles/vulnérables qui, lorsqu'elles sont touchées, peuvent perturber les autres zones du territoire [D'Ercole 2009].

### 5.1.2 Le concept de résilience

La résilience est un concept intrinsèquement lié à la vulnérabilité. Les deux concepts sont souvent considérés comme des opposés [Adger 2000, Gunderson 2002], l'un ayant des aspects plutôt positifs et l'autre des aspects négatifs. Le terme résilience, l'aspect positif,

trouve son origine dans "resilio", un mot latin qui signifie rebondir. Il s'agit donc de rebondir après avoir subi un choc. C'est la capacité d'un système à absorber un choc et à retrouver après celui-ci son état initial [Dauphiné 2007]. Tout comme la vulnérabilité, les définitions et les tests de mesure sont également nombreux [Dauphiné 2007, Villar 2014]. La mesure de la résilience peut être étudiée en considérant l'amplitude maximale de l'aléa que le système peut supporter (et continuer à exister). Cependant, cette amplitude maximale est difficile à évaluer. Pour compléter la définition et la mesure, on peut assimiler la résilience à la persistance (au sens du maintien des fonctions) [Holling 1973]. La résilience est alors l'inverse d'un temps de retour. Il s'agit du temps que mettra un système à retrouver un état d'équilibre après une perturbation [Dauphiné 2007]. Ce temps de retour dépend donc de l'intensité du choc. La figure 5.2 ci-après schématise le concept de résilience : la bonne santé d'un système est exprimée en fonction du temps.

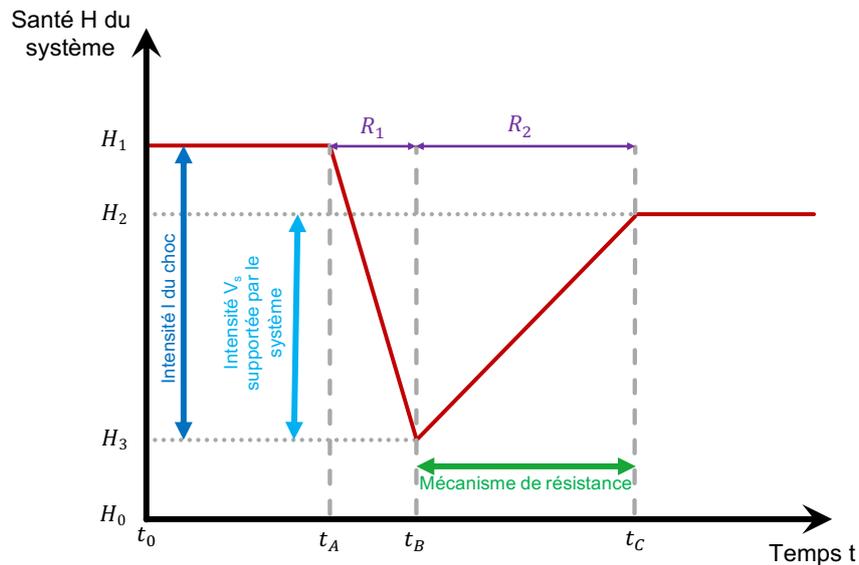


FIGURE 5.2 – Schématisation du concept de résilience et de vulnérabilité

Le système est stable dans le temps jusqu'à l'intervention d'une catastrophe en  $t_A$  qui perturbe le système. De  $t_A$  à  $t_B$ , le système est impacté. De  $t_B$  à  $t_C$ , le système active son mécanisme de résistance pour atteindre un nouvel état de stabilité en  $t_C$ , signe de sa résilience. La résilience s'exprime alors par la combinaison de deux premiers éléments :  $R_1$ , le temps de réaction du système (équation 5.1), c'est-à-dire le temps pris par le système pour enclencher une réaction, et  $R_2$ , la durée de la réaction (équation 5.2), c'est-à-dire le temps que le système va prendre pour retrouver un état de stabilité :

$$R_1 = t_B - t_A \quad (5.1)$$

$$R_2 = t_C - t_B \quad (5.2)$$

Cependant, la résilience est aussi une question d'intensité du choc qui peut être absorbé par le système. L'intensité du choc peut être formulée par  $I = H_1 - H_3$ . L'intensité supportée par le système est  $V_s = H_2 - H_3$ .  $V_s$  caractérise la vulnérabilité du système. Un système résilient doit répondre à la condition :  $H_3 > H_0$ .

La résilience peut également être appréhendée par une approche systémique. L'approche systémique est en effet indispensable à l'analyse de la vulnérabilité et de la résilience [D'Ercole 1994]. En particulier, quand on s'intéresse au système "territoire", la complexité du "système", la multiplication des éléments vulnérables et des facteurs de vulnérabilité rend l'approche systémique indispensable [D'Ercole 1994]. Dans l'approche systémique de la résilience, les instruments de mesure sont empruntés à la dynamique des systèmes : l'étude du comportement d'un système se fait à travers un portrait de phase [Dauphiné 2007]. Trois paramètres seront alors indispensables à l'analyse :

- La taille du bassin d'attraction dans lequel se trouve le système,
- la profondeur du bassin,
- et le positionnement du système par rapport aux limites du bassin.

Dans l'approche systémique de la résilience, la recherche de l'équilibre n'est pas l'objectif. Le système est plutôt considéré comme un attracteur évoluant dans un champ d'attraction. C'est alors la taille du domaine d'attraction qui va caractériser la résilience. Plus le domaine est grand, plus le système a de chances d'être résilient [Aschan-Leygonie 2000].

Les approches de la résilience sont donc nombreuses et les méthodes de mesure peuvent varier considérablement. Le lien avec la vulnérabilité et la durabilité est étroit et la définition de l'une conduit à la prise en compte des autres.

### 5.1.3 Les concepts de soutenabilité et d'inégalité

Le concept de durabilité a été largement discuté dans la littérature. Depuis sa création en 1987, le développement durable a déchaîné les passions avec plusieurs études et publications. On a même assisté à l'émergence d'une nouvelle discipline : la science de la durabilité [Turner 2003]. Ce concept est né dans les années 1990 aux États-Unis lors des travaux des Nations unies sur le développement durable [Berdoulay 2014]. La science de la durabilité fait référence à un champ de préoccupations scientifiques et technologiques, qui se définit principalement par des problèmes liés à la durabilité. Ces préoccupations sont transdisciplinaires [Berdoulay 2014], ce qui permet d'appréhender la complexité des relations Homme/environnement [Jerneck 2011]. Le développement durable, tel que défini dans le rapport Brundtland en 1987, vise à promouvoir un développement soucieux des générations futures tout en corrigeant les inégalités de développement entre les territoires. L'objectif du développement durable serait alors double : interdépendance d'une part et équité spatiale et temporelle d'autre part [Toubin 2012]. Un développement durable implique de protéger les potentialités, de renforcer les capacités et de favoriser le transfert entre générations (principe d'équité temporelle) [Gondard-Delcroix 2004] et entre territoires (principe d'équité spatiale).

Il existe une subjectivité dans la notion de développement durable, relative aux objectifs recherchés, aux territoires concernés et à l'échelle de temps choisie [Toubin 2012]. Comprendre la durabilité à travers la vulnérabilité et/ou la résilience pourrait corriger cette sub-

jectivité. Le concept de vulnérabilité laisse en effet moins de place à la subjectivité et facilite l'étude et l'interprétation. Il existe un lien étroit entre les trois concepts et la vulnérabilité : la durabilité peuvent être liées à travers la résilience. En effet, alors que la vulnérabilité met en avant les faiblesses, la résilience se concentre sur les forces. Le terme résilience peut être défini comme la capacité d'un système à absorber un choc et à se relever [Dauphiné 2007].

Les effets d'échelle de la vulnérabilité sont nombreux et le sens de la vulnérabilité peut changer selon que l'on étudie un individu, une famille, une infrastructure, un réseau ou un territoire dans son ensemble [Leone 2006]. Un autre défi consiste à identifier les bons indicateurs pour étudier la vulnérabilité ou la durabilité d'un territoire. Si la durabilité est l'objectif à atteindre et que la vulnérabilité met en évidence les faiblesses du territoire, la résilience pourrait être le moyen d'atteindre la durabilité. Certains auteurs considèrent en effet la résilience comme les clés de la durabilité [Barrocca 2013]. La résilience pourrait aller plus loin dans l'étude de la durabilité [Villar 2014]. Les tests de mesure de la résilience sont nombreux [Dauphiné 2007, Villar 2014]. Il serait possible de l'étudier en considérant l'amplitude maximale de l'aléa que le système peut supporter (et continuer à exister). Cependant, cette amplitude maximale est difficile à évaluer et nécessite des indicateurs pour la caractériser.

## 5.2 Création de bases de données et sélection de variables

La question de l'information et des données est importante. Nous disposons aujourd'hui d'une quantité abondante de données, de sources différentes, formalisées de manière variée, structurées ou non structurées. Il s'agit d'informations brutes que les Data Science vont chercher à rassembler et analyser pour en extraire des informations pertinentes. L'abondance de la donnée peut noyer l'information et le premier objectif du scientifique sera d'identifier les données pertinentes. Plusieurs méthodes existent pour cela : la première consiste en la compréhension du phénomène étudié dans une approche cartésienne. Les variables sélectionnées doivent être en rapport logique et rationnel avec l'objet ou le phénomène étudié. La seconde méthode consiste en l'application de méthodes statistiques pour la sélection de variables : méthodes de régression, tests statistiques, analyses factorielles, etc.

La donnée étudiée en Data Science, une fois épurée et formatée, se présente sous la forme d'un tableau de données où  $n$  individus notés  $e_1, \dots, e_i, \dots, e_n$  vont être représentés par  $p$  caractéristiques appelées variables et notées  $X_1, \dots, X_j, \dots, X_p$ . Ainsi, on va noter  $x_{ij}$  la valeur de la variable  $X_j$  observée sur l'individu  $e_i$ . La représentation de ces  $n$  individus représentées par  $p$  variables peut se faire sous forme de tableau  $n * p$  ou sous forme matricielle présentée ci-après.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Les individus représentent la population que l'on choisit d'étudier. Dans le cadre de mes

travaux, les individus sont assimilés à des territoires, tantôt des espaces insulaires, tantôt des pays. Les variables, quant à elles, constituent l'un de mes verrous scientifiques : il s'agit d'identifier les variables les plus pertinentes pour caractériser le phénomène considéré, la vulnérabilité énergétique.

### 5.2.1 La vulnérabilité énergétique des espaces insulaires : les spécificités

Caractériser la situation énergétique d'un territoire, en particulier insulaire, est une entreprise complexe du fait de la grande diversité des réflexions et considérations liées à l'énergie [Guerassimoff 2008]. Pour évaluer la situation énergétique d'un territoire, il est important de mettre en exergue les facteurs d'ordre démographique, économique, géographique et environnemental ainsi que les instruments politiques, économiques et technologiques. Les caractéristiques géographiques et politiques sont déterminantes dans la considération de la question énergétique en milieu insulaire. Il existe, en effet, différents niveaux d'insularité selon la configuration et le statut politique des espaces insulaires [Taglioni 2006] :

- l'hypo-insularité qui caractérise le niveau d'enclavement le moins élevé et qui désigne des îles-États développées et îles-territoires intégrées à une métropole industrialisée, des îles principales d'archipels indépendants développés ou intégrés à une métropole industrialisée ;
- l'insularité, niveau intermédiaire, qui représente des îles États en développement, des îles principales d'un archipel indépendant en développement, des îles secondaires d'un archipel intégré à une métropole industrialisée ;
- la surinsularité, le niveau d'insularité le plus fort et donc le plus contraignant, qui comprend les îles secondaires d'un archipel indépendant en développement et des cas particuliers d'îles sans port ou aéroport.

C'est à partir de cette classification de [Taglioni 2006] que [Guerassimoff 2008] a construit un indice de situation insulaire qui permet de prendre en compte de manière synthétique la diversité des contraintes propres aux espaces insulaires. Sur une échelle de 0 à 150, cet indice classe les îles d'un état d'hypo-insularité (0) à un état de surinsularité (150).

Quand il s'agit d'étudier la vulnérabilité énergétique de territoires insulaires, le niveau d'insularité représente une variable primordiale. Il traduit fortement une forme de fragilité et d'exposition du territoire et renvoie à des notions de forces et faiblesses, faisant échos aux définitions apportées de la vulnérabilité et de la résilience (Figures 5.1 et 5.2). Le niveau d'insularité, associé à une analyse des déterminants socioéconomiques, énergétiques (production et besoins) et environnementaux, permet d'obtenir une lecture globale du territoire et conduit à une représentation de la vulnérabilité énergétique. Cette vulnérabilité peut s'apprécier par l'association de multiples facteurs classés en trois catégories (Tableau 5.1).

TABLE 5.1 – Schématisation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire insulaire : vision Forces/Faiblesses/Besoins

Niveau d'insularité	Forces et potentiels	Besoins
Indice d'insularité [ISI]	PIB (US\$ 2010) [PIB]	Population [POP]
	% ENR dans la production d'électricité [X ENR]	Consommation d'électricité (GWh) [Conso Elec]
	Production d'hydroélectricité (GWh) [hydro]	

Pour représenter les faiblesses du territoire, la caractérisation de la situation géographique et politique est un élément pertinent qui donnerait alors une indication sur le niveau d'insularité. De même, l'identification des besoins en termes d'énergie est également un élément déterminant pour la définition de la vulnérabilité. Le potentiel du territoire serait identifié par sa richesse économique, son ouverture sur le monde et son potentiel de production d'électricité à partir de sources non fossiles ([Bénard-Sora 2017]).

Cette vision force/faiblesse/besoins permet une lecture synthétique, mais subjective du territoire. Les variables utilisées sont étiquetées dès leur sélection, entravant une approche exhaustive. Une autre vision nécessiterait donc d'outrepasser le concept de forces et faiblesses et de procéder à une décomposition simple du territoire. Un territoire se caractérise par des propriétés physiques, sociales, économiques, historiques, etc. Dans cette vision, la vulnérabilité énergétique est appréhendée de manière globale en listant les variables représentatives de chaque catégorie, sans étiquetage positif ou négatif.

La première composante à considérer est physique. La géographie impacte en effet la vulnérabilité énergétique à travers deux dimensions. La première est l'indice d'isolement, rapport entre la zone économique exclusive et la superficie totale de l'île. Il représente l'importance de l'isolement océanique [Doumenge 1985, Taglioni 2006]. La seconde est la surface, qui représente le potentiel exploitable, la superficie des terres. Cette catégorie de variables montre l'éloignement de l'île des principales routes maritimes et aériennes commerciales.

La deuxième composante concerne les informations sociales et économiques. Ces paramètres portent sur le niveau de développement humain, le dynamisme économique et le développement urbain.

Enfin, la dernière composante est la composante "énergie", objet principal de la réflexion : on la représente par sa consommation d'énergie, d'une part, et sa production, d'autre part, en y schématisant les parts hydroélectriques et renouvelables (Tableau 5.3) [Praene 2018].



FIGURE 5.3 – Schématisation de la vulnérabilité énergétique d'un territoire insulaire : décomposition du concept

### 5.2.2 Une vision internationale de la vulnérabilité énergétique : une analyse de soutenabilité

Dans une vision plus globale, la question de la vulnérabilité énergétique renvoie à la notion de soutenabilité des territoires. L'analyse et la compréhension de la vulnérabilité et de la résilience sont les clefs pour l'étude de la durabilité [Villar 2014]. Faire émerger, dans une étude, les forces et les faiblesses d'un territoire permet d'en retirer les éléments forts pouvant conduire à la durabilité et les éléments à développer. Vulnérabilité et durabilité pourraient être perçues comme antinomiques, tandis que la résilience pourrait être perçue comme un chemin entre vulnérabilité et durabilité. C'est dans cette optique que nous avons tenté d'analyser non pas la vulnérabilité énergétique, mais la soutenabilité d'un point de vue énergétique d'un territoire. Dans cette approche, nous avons rassemblé des variables classées en trois catégories : économie, social et environnement, les piliers du développement durable (Tableau 5.2). L'approche considère alors le dynamisme économique du pays, le niveau de développement humain et la taille de la population, le poids de la production et de la consommation énergétique, et l'impact environnemental.

TABLE 5.2 – Décomposition du concept de vulnérabilité énergétique sous le prisme du développement durable

Sustainability aspects	Label	Description
ENVIRONMENT	CO2E.KT	Carbon dioxide emissions
	CO2E.PC	CO2 emissions (metric tons per capita)
	PRIM.EN	Total Primary energy Consumption (TOE)
	ELEC.PC	Electric power consumption (kWh per capita)
	NET.IMP	Energy imports, net (% of energy use)
	ELC.RNW.Sh	Electricity production from renewable sources, excluding hydroelectric (% of total)
	NUCL.Sh	% of Nuclear generation
	HYDRO.Sh	% hydroelectric generation
	SOL.Sh	% Solar
	GEO.Sh	% Geothermal
	WIND.Sh	% Wind
	BIOM.Sh	% Biomass
	ELEC.DIS	Electric power transmission and distribution losses (% of output)
	SRF	Surface area (sq.km)
SOCIAL	POP	Total population
	POP.DENS	Population density
	POP.GR	Population growth
	POP.URB	Urban population
	POP.URB.GR	Urban population growth
	POP.MED	Population median age (years)
	IMP.WAT	Improved water source (total)
	LIF.EXP	Life expectancy at birth, total (years)
	DEA.RT	Death rate, crude (per 1,000 people)
	MOR.RT	Mortality rate, infant (per 1,000 live births)
	HDI	Human development Index
ECONOMIC	GNP.PP	GNI per capita, PPP (current international \$)
	GDP.GR	GDP growth (annual %)
	DI.NV	Foreign direct investment, net inflows (% of GDP)
	FOOD	Food imports (% of merchandise imports)
	EMP.RT	Employment to population ratio, 15+, total (%) (modeled ILO estimate)
	LABO.FE	Unemployment, female (% of female labor force) (national estimate)

### 5.2.3 La donnée : agrégation et construction de bases

Mes travaux s'effectuent sur des territoires de tailles différentes. L'objet principal est le territoire insulaire, mais des extensions de la méthodologie de travail ont été testées à l'échelle de pays. Basées sur une approche comparative, les méthodologies appliquées nécessitent des données répondant à des critères de construction communs et des critères de robustesse. Les sources de récupération de données sont abondantes et parfois divergentes pour un pays donné, une variable donnée sur une année donnée. Pour éviter toute incohérence, la méthodologie de construction des bases de données privilégie :

- la récupération de données sur des sites internationaux regroupant un maximum de variables sur un maximum de territoires : Banque Mondiale, Agence internationale de l'Énergie, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, etc ;
- la récupération de données sur des sites de statistiques régionales telles que Eurostat pour la zone Europe ;
- la récupération d'une variable sur une même source de données : par exemple, les données de l'Indice de Développement Humain sont récupérées sur le site du Programme National des Nations Unies pour le Développement pour tous les territoires étudiés.

L'ensemble des données récupérées doivent ensuite être prétraitées avant de pouvoir tout assembler. Les différences d'échelle, de moyenne, de variance et d'unité ne permettent pas une interopérabilité des données. Pour y remédier, et permettre une lecture comparative, il faut, au préalable, centrer-réduire les données. Pour toute variable  $x$ , de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ , on calcule  $z$ , la valeur centrée réduite de  $x$  tel que :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.3)$$

### **5.3 La création d'indicateurs de mesure de la vulnérabilité énergétique par analyse factorielle**

Trois types de mesures de la vulnérabilité sont envisagées dans la littérature [Dauphiné 2007] :

- des mesures disciplinaires simples qui ne considèrent qu'un aspect unique de la résilience/vulnérabilité/soutenabilité ;
- des mesures issues de la dynamique des systèmes qui associent au système plusieurs attracteurs ;
- des mesures via indicateurs multidimensionnels.

L'ensemble de ces mesures sont quantitatives. Ainsi, les mesures disciplinaires simples vont quantifier l'ampleur maximale d'un aléa pour que le système étudié ne disparaisse pas. En écologie, cela revient à mesurer la disparition de tout ou partie d'un écosystème (en quantifiant), tandis qu'en sciences du risque, cela revient à mesurer l'impact d'une catastrophe. Dans ces approches, la résilience est assimilée à la persistance : le système continue à exister même après avoir subi un choc. Dans cette acception, la vulnérabilité est ici inspirée des travaux fondateurs de C. Holling [Holling 1973] où il ne s'agit pas simplement d'étudier comment le système peut retrouver un état de stabilité dans son bassin initial après en avoir été éloigné par un perturbateur (*engineering resiliency*) mais plutôt de voir comment le système persiste et s'adapte pour retrouver un nouvel état de stabilité, parfois dans un bassin différent (*ecological resiliency*) [Genin 2016]. On admet donc l'existence de plusieurs bassins dans lesquels le système peut fonctionner. Cela nous amène aux deuxièmes types de mesure qui considèrent les phénomènes de transformation, d'apprentissage et d'innovation au sein des systèmes comme des caractéristiques de résilience [Brand 2007]. Ainsi, il n'est plus question d'étudier un système avec une simple évolution linéaire sans considération du temps. Il s'agit plutôt d'étudier un système dynamique, intégrant ainsi l'influence du temps sur le système [Adger 2004]. Enfin, le troisième type de mesure consiste à identifier des indicateurs qui vont prendre en compte plusieurs paramètres de vulnérabilité. La combinaison des indicateurs permet ainsi une prise en compte globale de la vulnérabilité et de la résilience d'un territoire, à l'exemple des travaux de [De Bruijn 2005] sur le risque inondation ou de [Jones 2003] sur l'adaptation aux changements climatiques.

Trois types d'études mettent en œuvre ces mesures :

- des études menant à des comparaisons territoriales (par exemple dans les travaux de [Briguglio 2009, Bénard-Sora 2017, Praene 2018]);
- des études permettant une évaluation générale de la menace ;
- des études ayant pour but d’améliorer la compréhension des facteurs qui déterminent la vulnérabilité afin d’identifier des mesures pour réduire la vulnérabilité.

Les trois types d’études se chevauchent parfois [Adger 2004]. De manière générale, les études réalisées se basent sur des indicateurs multidimensionnels dans le but d’opérer une comparaison des territoires via une classification, voire un classement. Ces comparaisons et opérations de clustering/ranking permettent de situer le territoire au regard de la menace envisagée, de mettre en évidence des facteurs de vulnérabilités et d’envisager des mesures de réduction. Ces opérations, bien qu’instructives, souffrent néanmoins de deux faiblesses : premièrement, la vulnérabilité est un fait complexe inhérent aux caractéristiques profondes du territoire [Adger 1999] qui ne peut donc s’appréhender que de manière comparative ; deuxièmement, il est de plus en plus reconnu que la vulnérabilité est un fait dynamique [Campbell 1999, Adger 2004]. La caractérisation de la vulnérabilité d’un territoire doit donc idéalement passer par des études cherchant à identifier les facteurs de vulnérabilité du territoire pour le positionner par rapport à la menace. Cette approche permet de reconnaître la présence de plusieurs attracteurs. En outre, les recherches en urbanisme convergent également dans ce sens depuis un certain nombre d’années. Les villes et territoires sont en effet considérés de plus en plus comme des systèmes complexes, régis par de nombreux degrés de liberté, interagissant de manière non linéaire à différentes échelles spatiales et temporelles [Albeverio 2008]. Ces approches dépassent l’analyse factorielle et introduisent la possibilité d’une analyse simultanée de la dimension spatiale et de la dimension temporelle, permettant d’approcher de manière plus fine le fonctionnement des systèmes [Chamussy 1984].

### 5.3.1 La création d’indicateurs de mesure

Le terme "indicateur" appelle plusieurs définitions qui convergent néanmoins vers un point : un indicateur vient traduire un phénomène ou un concept. Cette traduction se fait de manière simplifiée, permettant d’étendre sa compréhension à un public élargi, ainsi que sa réplique. Outre l’objectif de simplification d’une information complexe, l’indicateur rend également possible des comparaisons dans le temps et dans l’espace. Par exemple, le Produit Intérieur Brut (PIB) est l’indicateur économique de référence pour la traduction de la richesse d’un pays. Pour traduire des phénomènes complexes, on fait parfois appel à des indicateurs composites. Ces derniers vont procéder par agrégation d’indicateurs individuels pour synthétiser une information au sein d’une valeur unique. De manière la plus simplifiée possible, un indicateur composite suit une représentation linéaire. En considérant un nombre  $n$  d’indicateurs individuels  $I_i$  de poids  $w_i$ , l’indicateur composite se présente sous la forme suivante :

$$CI = \sum_{i=1}^n I_i \cdot w_i \quad (5.4)$$

### 5.3. La création d'indicateurs de mesure de la vulnérabilité énergétique par analyse factorielle

Un exemple phare d'indicateur composite est l'Indice de Développement Humain (IDH) développé par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) dans les années 1990 afin d'apporter une dimension différente de la simple richesse économique au développement d'un pays [Dialga 2014]. Les indicateurs composites, bien que pratiques pour les décideurs, ont néanmoins subi de vives critiques portant notamment sur la subjectivité dans le poids attribué aux différents indicateurs individuels, de même que dans le choix de ces indicateurs [Saltelli 2010, Chiappini 2012].

Ces deux points constituent les points d'orgue de mes recherches :

- Comment identifier les variables pertinentes pour l'étude de la vulnérabilité énergétique ?
- Comment attribuer un poids à ces différentes variables ?

La méthodologie employée pour répondre à ces deux points est basée sur la combinaison de plusieurs méthodes d'analyses factorielles dont l'Analyse en Composantes Principales et le Clustering. Chacune de ces analyses va avoir une utilité dans le calcul et l'interprétation de l'indicateur de vulnérabilité énergétique. Le schéma, ci-après, permet de dresser le protocole de travail (Figure 5.4).

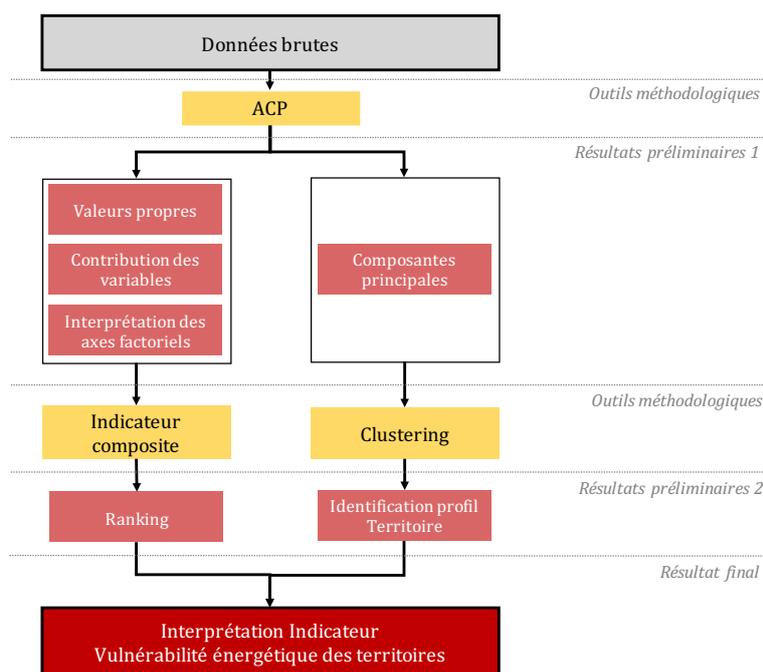


FIGURE 5.4 – Création d'un indicateur composite : protocole de travail

La première étape consiste donc en la réalisation de l'ACP. De cette ACP, trois éléments vont être prélevés pour construire l'indicateur composite : (i) Valeurs propres associées aux composantes principales : identification du nombre de composantes à considérer dans l'analyse et le calcul, identification du poids à affecter à chaque composante ; (ii) Contribution des variables à la construction des dimensions : identification du poids à affecter à chaque variable dans le calcul de la composante ; (iii) Cercle des corrélations : interprétation des

dimensions pour l'identification des variables clés affectées à chaque composante.

Parallèlement à la construction de l'indicateur et à des fins de complémentarité, le clustering réalisé sur les résultats de l'ACP va permettre d'identifier et de mettre en exergue différents profils de territoires. Ces profils seront ensuite utilisés pour l'analyse des résultats de l'indicateur construit.

### 5.3.2 Analyses factorielles et clustering

L'analyse en composantes principales (ACP) est un outil d'analyse de données permettant de traiter un grand nombre d'informations : un grand nombre  $n$  d'individus  $e$  représentés par une quantité importante  $p$  de variables  $X$  corrélées. Ces informations sont ensuite réduites par la construction de nouvelles variables non corrélées, appelées composantes principales. C'est une méthode puissante pour explorer la structure de ce type de données [Saporta 2006]. Alors que l'analyse en composantes principales est considérée comme la "mère" des analyses multidimensionnelles de données, ses pères fondateurs sont Pearson [Pearson 1901], Spearman [Spearman 1904] et Hotelling [Hotelling 1933, Hotelling 1936]. Ils ont posé les bases de l'analyse factorielle telles qu'on la connaît aujourd'hui [Bouroche 2006]. Le problème posé est le suivant : il s'agit de la recherche d'un petit nombre de dimensions permettant de reconstituer l'information initiale. Le terme de facteur a été introduit par Spearman mais l'Analyse en Composantes principales est attribuée à Hotelling [Pages 1979].

#### La construction d'une ACP - Point méthodologique

Considérons les vecteurs individu  $e_i$  et variable  $x_j$  de la matrice  $X$  présentée dans la section 5.2. Le vecteur individu  $e_i$  est un élément d'un espace vectoriel, appelé espace des individus, noté  $E$  de dimension  $p$ . On a  $E \in R^p$ . Le vecteur variable est un élément d'un espace vectoriel, appelé espace des variables, noté  $F$  de dimension  $n$ .  $F \in R^n$ . L'ACP va poursuivre 3 principaux objectifs. Le premier objectif est la réduction des dimensions, tel que posé par Pearson, Spearman et Hotelling. Il s'agit de réaliser une approximation de  $X$  par un tableau de rang  $k$  avec la contrainte suivante :  $k < p$ . On obtient alors un jeu de données avec de nouvelles variables appelées, composantes principales, représentées sur des axes dits factoriels et notés  $Dim_i$ . Les deux autres objectifs consistent en la représentation graphique des individus et des variables dans des sous-espaces créés par l'ACP notés respectivement  $E_k$  et  $F_k$  et respectant la même contrainte :  $k < p$ .  $E^k$  est un sous-espace tel que le nuage de points projetés (les individus) ait une inertie maximale. L'objectif est donc que les composantes principales  $Dim_i$  calculées représentent le maximum d'informations possibles d'une base de données standardisées. La méthode consiste ensuite en la recherche des composantes principales du sous-espace  $E^k$  sur la base de deux contraintes : la somme des carrés des distances et des individus à  $F^k$  doit être minimale. La distance calculée est la distance euclidienne, telle que la distance entre deux unités  $e_i$  et  $e_{i'}$  est égale à

$$d^2(e_i, e_{i'}) = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad (5.5)$$

Les composantes principales sont non corrélées et donc orthogonales. Dans cette projection orthogonale, l'inertie totale du nuage de points doit être maximale. C'est en créant des composantes complémentaires que cette maximisation est rendue possible. La première composante principale capte le maximum d'informations du tableau initial. Le résidu non saisi par cette première composante devient alors la cible des composantes suivantes, qui arrivent donc en complément. En effet, la deuxième composante va tenter de saisir ces informations résiduelles en maximisant de nouveau la quantité d'informations traduites. La troisième composante va tenter ensuite de saisir le nouveau résidu, et ainsi de suite jusqu'à obtenir une inertie parfaite. Ainsi, aucune redondance d'informations n'existe entre les composantes principales créées puisque chaque composante  $i + 1$  s'attaque à la représentation des informations résiduelles de la composante  $i$ . L'ACP procède donc à une transformation d'un jeu de données corrélées en un nouvel ensemble de données non corrélées et d'importance décroissante. Mathématiquement, cela revient à rechercher les valeurs propres  $\lambda_i$  et les vecteurs propres  $c_i$  d'une matrice carrée : la matrice de corrélation ou matrice de variances-covariances. Les vecteurs propres  $c_i$  sont alors les coefficients des combinaisons linéaires utilisées pour le calcul des composantes principales ( $CP_i$ ) :

$$CP_i = \sum_{j=1}^p (c_{i,j} x_j) \quad (5.6)$$

Les valeurs propres vont représenter la variance des individus sur les axes factoriels et renseignent ainsi sur l'inertie représentée par la composante principale. La valeur propre sera alors un élément principal dans l'analyse des résultats de l'ACP puisqu'il va renseigner sur la quantité d'informations traduites par les axes factoriels.

Dans nos travaux, nous utilisons la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les résultats de l'ACP afin de classer nos territoires et caractériser la vulnérabilité énergétique. La classification hiérarchique est utile, car elle ne nécessite pas d'avoir au préalable le nombre de groupes  $Q$  à identifier dans notre population  $N$ . Après avoir calculé une matrice des distances, la méthode de Ward <sup>1</sup> permet le calcul d'un dendrogramme qui va afficher les différents regroupements effectués par la CAH. Le dendrogramme affichera des groupes et sous-groupes de plus en plus vastes jusqu'à obtenir  $n$  groupes correspondant au  $n$  individus de la population  $N$ . La partition désirée s'obtient alors en découpant le dendrogramme selon la hauteur choisie. La représentation graphique se fait ensuite par la projection des clusters sur les composantes principales créées grâce à l'ACP permettant ainsi de combiner les deux analyses : l'interprétation des composantes principales permet ainsi de mieux comprendre et caractériser les clusters obtenus par la CAH. Ainsi, l'étape de caractérisation de la vulnérabilité énergétique atteint ici un palier important de notre travail.

---

1. Algorithme permettant de regrouper deux classes d'une partition en faisant le moins baisser l'inertie interclasse. C'est la distance de Ward qui est utilisée : la distance entre deux classes est celle de leurs barycentres au carré, pondérée par les effectifs des deux clusters.

**Le clustering ou classification non supervisée - Point méthodologique**

La classification est une méthode d'analyse et de représentation de données qui a pour but de partitionner une population  $N$  étudiée afin de la regrouper en différentes classes. Il s'agit donc de segmenter et regrouper  $n$  observations en un nombre  $q$  de groupes ou de classes homogènes. On distingue globalement la classification supervisée de la classification non supervisée. Dans la classification supervisée, le nombre de groupes  $Q$  qui segmentent la population  $N$  est connu à l'avance et l'objectif est de construire une règle de classement permettant de prédire l'appartenance à un groupe  $Q$  de toute nouvelle observation  $n_i$ . En classification non supervisée, on ne connaît pas le nombre  $q$  de groupes segmentant la population  $N$ . Ainsi, à partir d'un ensemble de  $p$  variables (appelées descripteurs) décrivant les  $n$  individus de la population  $N$ , il s'agit d'identifier des caractéristiques communes, des typologies existantes permettant de segmenter la population en  $q$  groupes. En somme, on réalise un partitionnement de la population, ou *clustering* en anglais.

Il existe plusieurs méthodes de *clustering*, parmi lesquelles les classifications hiérarchiques et les partitionnements en nuées dynamiques. Il s'agit de méthodes exploratoires qui consistent en un regroupement en classes à partir de considérations géométriques. Deux étapes sont alors nécessaires :

1. la définition d'un critère de ressemblance/dissembance (similarité ou dissimilarité ?) et d'une distance ;
2. l'identification de classes homogènes (respectant un critère de compacité) et différenciées (respectant un critère de séparabilité).

Deux individus d'une même classe sont les plus ressemblants possibles et deux individus appartenant à deux classes différentes sont les plus dissemblants possibles. Le critère de ressemblance s'exprime à travers d'une matrice de distance qui va exprimer la distance entre chaque individu pris deux à deux. Plus les individus se ressemblent et plus la distance s'approche de 0, et inversement.

### 5.3.3 La mesure de la vulnérabilité énergétique : création d'un indicateur composite

L'indicateur composite est fonction de trois éléments : les dimensions sélectionnées, les variables principalement contributives à la construction de ces dimensions et les valeurs propres. On a :

$$IC = f(Dim_i, X_j, \lambda_i) \quad (5.7)$$

Dans nos travaux réalisés, trois méthodes de calcul ont été abordées.

#### ▼ Méthode 1 : Indicateur IVEN, présenté au colloque ASRDLF 2017

Dans ce premier travail réalisé [Bénard-Sora 2017], l'objectif était le calcul d'un indicateur de vulnérabilité énergétique pour caractériser les Petits États Insulaires en Développement (PEID). Un échantillon de 29 PEID a été construit à partir de 9 variables caractérisant

le niveau d'insularité, les besoins, les forces et potentiels des territoires étudiés.

L'ACP réalisée sur ce jeu de données a permis d'identifier trois composantes principales pour la suite du travail, avec une variance expliquée de 82,82% (Tableau 5.3).

TABLE 5.3 – Valeurs propres et pourcentage d'inertie

Composantes principales	Valeurs propres ( $\lambda_m$ )	% variance	% cumulé
<b>CP1</b>	<b>2,34</b>	<b>39,07</b>	<b>39,07</b>
<b>CP2</b>	<b>1,77</b>	<b>29,49</b>	<b>68,56</b>
<b>CP3</b>	<b>0,85</b>	<b>14,26</b>	<b>82,82</b>
CP4	0,64	10,73	83,55
CP5	0,35	5,75	99,30
CP6	0,04	0,70	100

Le calcul de l'indicateur composite s'appréhende comme une combinaison linéaire des dimensions les plus représentatives, pondérées par leur valeur propre. On a alors :

$$IC = f(Dim1, Dim2, Dim3) = \sum_{m=1}^3 \lambda_m \cdot Dim_m \quad (5.8)$$

Il faut noter à ce niveau qu'il est important d'interpréter les axes factoriels créés afin de déterminer quelles sont les variables les plus contributives à leur construction et établir ainsi si ces axes évoluent de manière positive ou soustractive avec la notion de vulnérabilité énergétique. Le choix entre addition ou soustraction provient du bon sens. En effet, dans la représentation de la vulnérabilité énergétique, certaines variables considérées sont identifiées comme impactant "positivement" la vulnérabilité (en l'augmentant) tandis que d'autres variables vont au contraire réduire la vulnérabilité.

L'interprétation des axes factoriels passe par l'interprétation des cercles de corrélation. Des cercles obtenus sur le cas présent, nous pouvons retirer les informations suivantes :

$$Dim1 = f(PIB, Conso) \quad (5.9)$$

$$Dim2 = f(Hydro, XENR) \quad (5.10)$$

$$Dim3 = f(Pop, ISI) \quad (5.11)$$

Ainsi, grâce à la table de contribution des variables à la construction des axes factoriels (Tableau 5.4), il nous est alors possible de proposer un indicateur de vulnérabilité énergétique. Pour le calcul de  $Dim1$ ,  $Dim2$  et  $Dim3$ , après une standardisation effectuée par une méthode min-max, chaque variable est pondérée de sa contribution à la construction de la dimension.

TABLE 5.4 – Contribution des variables

Variabes	Dim1	Dim2	Dim3	Dim4	Dim5
PIB	<b>38.39</b>	0.39	8.16	0.15	0.0326
Pop	11.50	15.29	<b>21.51</b>	35.27	13.75
Conso	<b>34.92</b>	0.002	17.35	0.86	2.5352
Hydro	0.01	<b>43.61</b>	5.13	2.61	48.5372
X.ENR	1.87	<b>35.97</b>	8.95	19.98	33.21
ISI	13.30	4.73	<b>38.89</b>	41.13	1.93

Le calcul de l'indice, réalisé pour chaque territoire, nous permet d'obtenir un indice qui évolue sur une échelle de -0,84 pour le territoire le moins vulnérable (Papouasie-Nouvelle-Guinée) à 1,88 pour le territoire le plus vulnérable (Singapour) (Figure 5.5).



FIGURE 5.5 – Représentation et interprétation de l'indice IVEN

Les résultats permettent de mettre en évidence plusieurs points. En premier lieu, un indice négatif traduit une situation de vulnérabilité faible et une politique énergétique en faveur des énergies renouvelables. Ainsi, sur notre échantillon, les deux seules îles affichant ce type de politique énergétique (un taux de pénétration plus de 50% des énergies renouvelables) sont considérées comme peu vulnérables. Dans cette forme, la part de la politique énergétique en faveur des énergies alternatives aux énergies fossiles prend donc un poids considérable. Ensuite, une forte corrélation existe entre le niveau de développement et la vulnérabilité énergétique. En dehors de la considération de politique énergétique en faveur des énergies renouvelables, les îles développées affichent un niveau de vulnérabilité plus faible que les pays en développement. Le cas de Grenade permet de montrer que cette situation peut s'inverser avec la mise en place de politique énergétique en faveur des énergies renouvelables. Enfin, le mode de vie d'un territoire est également déterminant dans la prise en compte de la vulnérabilité énergétique. Les cas de Singapour, du Bahreïn et de

Trinidad et Tobago attestent, que peu importe le niveau de développement d'un pays, un mode de vie énergivore peut faire basculer un pays en situation de vulnérabilité forte.

▼ **Méthode 2 : Travaux publiés dans la revue *Utilities Policy***

Dans ce second travail [Praene 2018], nous avons poursuivi la méthodologie de base en modifiant deux points : il s'agit cette fois du calcul d'un indicateur de durabilité (*sustainability index*) noté *SI* et non pas d'un indicateur de vulnérabilité; le calcul de l'indicateur est sensiblement différent dans la considération des valeurs propres.

$$SI = 1 - \frac{\sum_{m=1}^q \lambda_m \cdot Dim_m}{\sum_{m=1}^q \lambda_m} \quad (5.12)$$

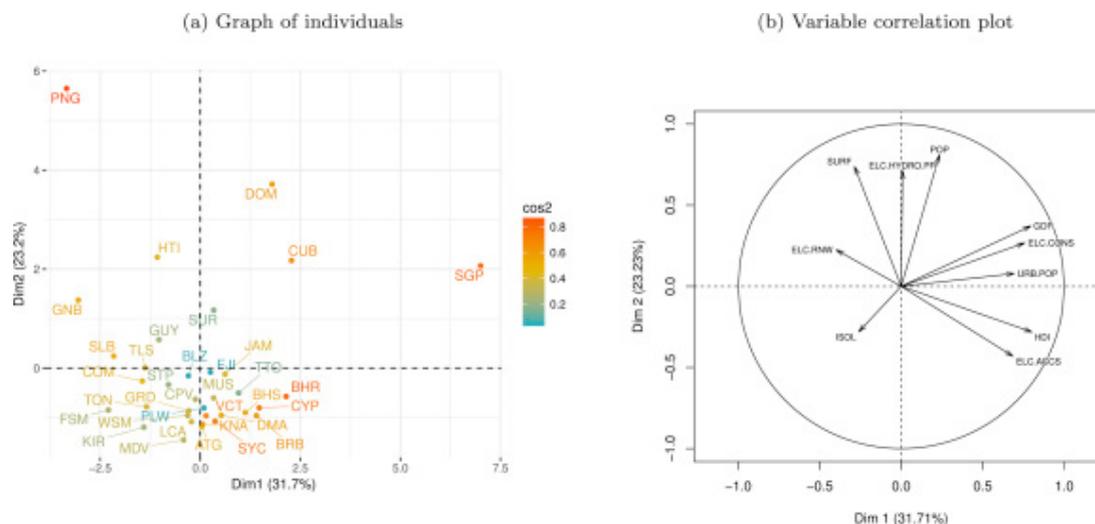
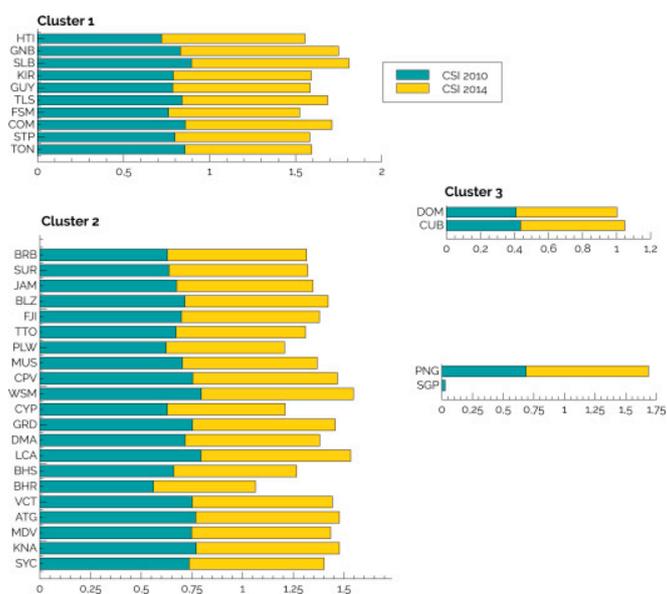
En effet, cette nouvelle vision du calcul de l'indicateur revient à la réalisation d'une moyenne pondérée. L'utilisation d'une moyenne plutôt que d'une simple somme permet d'apporter un meilleur résumé des valeurs prises sur chaque dimension, tandis que la pondération nous permet de garder l'importance relative de chaque dimension par rapport aux autres.

Le travail a été réalisé sur un jeu de données composé de 35 îles et 10 variables réparties en 3 catégories : Géographie, Socio-Economie et Energie. Selon le critère de Kaiser, trois dimensions sont retenues pour la suite de l'analyse. Grâce aux cercles de corrélations permettant de projeter les variables sur les nouvelles dimensions créées, nous pouvons retenir les informations suivantes :

- *Dim1* est principalement définie par le PIB, la consommation d'électricité et la population urbaine. Ces variables représentent la situation socio-économique des territoires,
- *Dim2* est caractérisée par la superficie, la population et la production d'hydroélectricité. Cette dimension, en combinant superficie et taille de la population ainsi que production d'hydroélectricité, représente le potentiel "économique/industriel" du territoire,
- *Dim3* est fonction de l'indice d'isolement, de la part des énergies renouvelables et de la consommation d'électricité. Ces variables contiennent des informations utiles concernant la vulnérabilité électrique des îles.

Les résultats de l'Indicateur Composite obtenu ont été utilisés dans cette étude non pas pour traduire une vulnérabilité ou durabilité par rapport aux autres territoires, mais plutôt pour traduire une dynamique de chaque territoire entre deux années : 2010 et 2014.

Les résultats présentés dans la figure 5.7 montrent que globalement, il y a eu peu d'augmentation de l'index calculé entre 2010 et 2014. Les baisses les plus fortes sont enregistrées pour les îles de Tonga (TON), les Seychelles (SYC), les Maldives (MDV) et Saint-Kitts-et-Nevis (KNA). Ces îles ont connu une augmentation de leur population urbaine et, simultanément, une diminution du PIB. Leur vulnérabilité est principalement due à leur forte dépendance à la consommation de pétrole pour la production d'électricité, car aucune source d'énergie renouvelable n'a été réellement développée. Les indices les plus faibles sont observés chez les territoires les plus développés. En effet, les cas de Singapour (SGP), Cuba (CUB), Dominique

FIGURE 5.6 – Résultats ACP - from *Utilities Policy*FIGURE 5.7 – Résultats ACP - from *Utilities Policy*

(DOM) et Bahreïn (BHR) se caractérisent par une consommation d'électricité très élevée par rapport aux autres îles, avec une intégration faible, voire nulle, des énergies renouvelables. Ces îles ont des économies en forte croissance qui ont induit le déploiement d'une forte intensité énergétique dans les territoires. Pour chaque année observée, Singapour est le pays le moins durable.

Ce travail a permis de pointer du doigt deux freins pour la durabilité des territoires insulaires dans le contexte de la transition énergétique :

- la croissance accélérée de la population urbaine qui augmente les besoins en énergie et ralentit la croissance économique,

- une croissance économique trop forte et trop énergivore.

▼ **Méthode 3 : Travaux présentés dans le cadre du colloque Sustainable Energy and Environmental Protection conference**

Réalisé sur un jeu de données composé de 28 pays de l'Union Européenne (UE), ce travail s'éloigne du champ habituel de nos travaux portés sur la vulnérabilité des petits espaces insulaires [Praene 2019]. L'objectif est néanmoins resté le même : la représentation de la vulnérabilité énergétique des territoires. Plus précisément, nous avons choisi de caractériser un indice de durabilité en considérant les piliers du développement durable, à savoir Économie, Environnement et Social. Dans un souci d'équilibre entre les piliers, et en respectant la vision internationale d'une prise en compte de manière égale de chaque Objectif de Développement Durable (ODD) [Sachs 2019], nous avons choisi de créer trois sous-indices correspondant aux trois piliers du développement durable et de les agréger par une moyenne géométrique.

L'indice de durabilité a été défini comme suit :

$$SI = \prod_s \left( \sum_{k=1}^j \omega_k^\mathfrak{s} F_{ki}^\mathfrak{s} \right)^{1/3}, i = 1, 2 \dots, 28 \quad (5.13)$$

Où  $F_{ki}^\mathfrak{s}$  représente les coordonnées des pays sur les composantes principales  $k$  et

$\omega_k^\mathfrak{s} = \frac{\sqrt{\lambda_k^\mathfrak{s}}}{\sum_{k=1}^j \sqrt{\lambda_k^\mathfrak{s}}}$  le poids associés à chaque composante principale dans le calcul des sous-indices thématiques  $\mathfrak{s} = \{ \text{Environment, Social, Economy} \}$ .

Pour le calcul du poids, afin de gommer les effets de compensation d'une moyenne traditionnelle, nous avons choisi de passer sous une forme quadratique.

Les sous-indices composites représentant les trois dimensions du développement durable sont ainsi construits en agrégeant les composantes sélectionnées. Ceux-ci sont pondérés par  $\omega_k^\mathfrak{s}$ , qui est basé sur les valeurs propres  $\lambda_k^\mathfrak{s}$  de chaque composante principale.

Les calculs ont été appliqués sur deux années de référence : 2000 et 2015. L'intérêt du travail n'était non pas de fournir une comparaison entre les différents territoires étudiés, mais bien de montrer l'évolution de chacun de ces territoires afin de mettre en exergue la dynamique de transition des pays de l'UE. Les résultats présentés dans la figure 5.8 font apparaître une image très contrastée pour l'Europe. Sur les 28 pays étudiés, seuls 15 pays affichent un indice plus élevé en 2015, et donc une transition énergétique positivement engagée. L'exemple le plus marquant est celui de l'Irlande avec une augmentation considérable de l'indice SI : en 15 ans, la situation du pays a effectivement considérablement évolué grâce à de forts investissements dans les énergies renouvelables, notamment éoliennes, qui ont permis de faire diminuer les émissions totales de  $CO_2$ . Pour les autres évolutions notables de l'indicateur SI, il s'agit essentiellement de progrès sociaux et économiques réalisés sur la période.

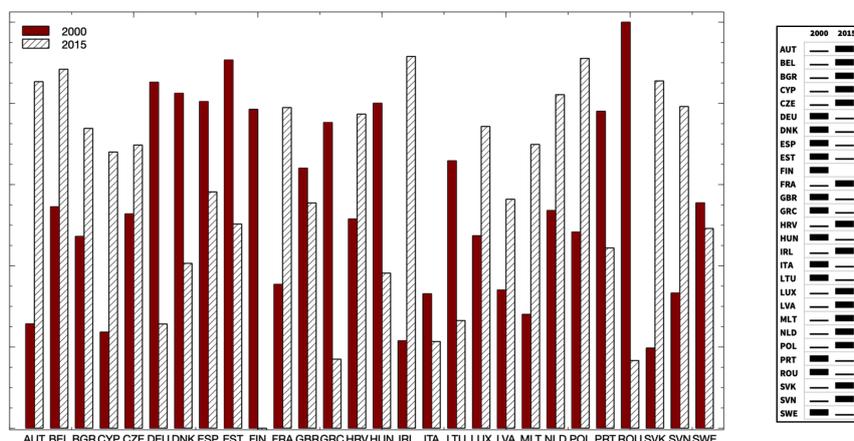


FIGURE 5.8 – Résultats de l'indicateur SI (2000 et 2015) - Pays de L'UE

## 5.4 La création d'indicateurs dynamiques par analogie aux sciences physiques

Un des objectifs de mes travaux est la caractérisation de la vulnérabilité énergétique des pays dans le monde. Cette caractérisation passe par deux aspects : (1) une vision globale de la notion de vulnérabilité énergétique d'un territoire et (2) la création d'indicateurs de visualisation de cette vulnérabilité. Ainsi, en combinant des méthodes d'analyse factorielles, de clustering et d'agrégation, nous avons pu répondre à ce besoin en proposant plusieurs formes de créations d'indicateur de vulnérabilité énergétique d'un territoire. Ces indicateurs peuvent avoir deux principales utilités :

- Utilisés à des fins de mesure de la dynamique de transition, ces indicateurs permettent de positionner chaque pays par rapport à lui-même sur une période donnée. Ainsi, son évolution est traduite par l'augmentation, la stagnation ou la baisse du même indicateur calculé sur a minima 2 années. L'analyse de l'évolution de l'indicateur plutôt que de son positionnement par rapport à d'autres pays permet de gommer un certain nombre de faiblesses : tout d'abord, la comparaison de plusieurs territoires très différents en termes de caractéristiques historiques, culturelles, géographiques, économiques, etc, peut mener à des conclusions alarmantes, surtout quand la méthode de construction de l'indicateur repose sur le jeu de données en entrée. Ensuite, la seconde faiblesse repose sur le concept même de vulnérabilité : fait complexe inhérent aux caractéristiques profondes du territoire [Adger 1999], la vulnérabilité ne peut donc s'appréhender uniquement de manière comparative. Enfin, la dernière faiblesse repose également sur la définition de la vulnérabilité : caractéristique d'état, certes, il est néanmoins de plus en plus reconnu que la vulnérabilité est un fait dynamique [Campbell 1999, Adger 2004]. Ainsi, l'analyse d'une dynamique d'évolution plutôt qu'une comparaison entre territoires semble pertinente.
- Utilisés à des fins de comparaison, ces indicateurs permettent de positionner les ter-

ritoires par rapport à un ensemble étudié et, parmi eux, identifier les territoires les plus durables (dans le sens de leur engagement dans la démarche de transition énergétique) et les plus vulnérables. Ces travaux permettent donc d'opérer des comparaisons (grâce à un scoring) mais ne permettent pas véritablement d'analyser les caractéristiques intrinsèques d'un territoire. Les territoires sont tous différents et alors qu'ils pourraient obtenir un même score sur un indicateur de vulnérabilité, leurs capacités de réponses, leurs éléments et leurs choix de réponses pourraient les mener dans des chemins de transition différents. Certains territoires pourraient alors basculer dans des situations de récession, quand d'autres pourraient au contraire se retrouver en situation de croissance. Avec une situation initiale identique au niveau du scoring, les territoires ne présentent finalement pas le même profil de vulnérabilité. Le modèle dynamique pourrait permettre d'identifier ces situations différentes, grâce notamment aux bassins d'attraction.

#### 5.4.1 L'analogie à l'énergie cinétique

De manière simplifiée, l'énergie cinétique peut être définie comme l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. La notion de mouvement est donc essentielle et implique un état de repos avant le début du mouvement. Autre façon de présenter les choses : l'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer le corps du repos au mouvement. Le corps a deux états : un état stationnaire et un état de mouvement provoqué par des forces exercées sur lui. En assimilant les forces exercées à la notion de choc ou de catastrophe présentée dans les figures 5.1 et 5.2, on pourrait alors déduire que l'énergie cinétique pourrait en fait être assimilée à la résilience du système. En considérant  $E_k$  l'énergie cinétique,  $m$  la masse du corps en mouvement en kilogramme (kg) et  $v$ , la vitesse du corps en mouvement en m/s, on présente l'énergie cinétique sous la forme suivante :

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.14)$$

Deux paramètres sont essentiels au calcul : la masse du corps considéré et sa vitesse de déplacement. L'un caractérise un état et le décrit, l'autre traduit un mouvement, une évolution. On peut en déduire la formule de calcul de la résilience  $R$  :

$$R = \frac{1}{2}I\rho^2 \quad (5.15)$$

avec  $I$  un indicateur d'état décrivant la situation du territoire étudié et représentant ainsi son poids, et  $\rho^2$  un indicateur de mouvement, assimilable par exemple à un taux de croissance.

##### ▼ L'indicateur d'état : indicateur composite

Conformément à la méthodologie présentée plus haut dans la section 5.3.3 une ACP a été réalisée pour l'année 2019 sur un tableau de données composé de 108 pays et 10 variables. L'ensemble des variables proviennent de la Banque mondiale (Tableau 5.5).

TABLE 5.5 – Variables utilisées pour l'ACP. Source = Banque mondiale

	<b>Variabes</b>	<b>Unité</b>
GDP per capita	PIB/hab	\$ courants
Population	Population	
Urban population	Population urbaine	
Imports of goods and services	Importations de biens et services	\$ courants
Exports of goods and services	Exportations de biens et services	\$ courants
GDP growth	Croissance du PIB	%
Industry, value added	Industrie (Valeur ajoutée)	%PIB
Agriculture, value added	Agriculture (Valeur ajoutée)	%PIB
Trade in goods	Commerce de marchandises	%PIB
Trade in services	Commerce de services	%PIB

L'indicateur synthétique est calculé de la manière suivante :

$$I = \frac{\sum_{m=1}^q \lambda_m \cdot Dim_m}{\sum_{m=1}^q \lambda_m} \quad (5.16)$$

avec  $\lambda_m$  la valeur propre associée à la dimension  $m$ ,  $Dim_m$  la composante principale, et  $Dim_m = f(x_j, \dots, x_p) = \sum_j \alpha_j \cdot x_j$

Le premier élément d'analyse et d'interprétation d'une ACP est constitué par les valeurs propres. En effet, ces valeurs vont indiquer le nombre de composantes principales utiles à conserver dans l'analyse et la variance expliquée associée. En utilisant le critère de Kaiser, nous sélectionnons les quatre premières composantes principales (en gras dans le tableau 2), ce qui nous permet d'expliquer 86,79% de la variance de nos données (Tableau 5.6).

	<b>Valeur propre</b>	<b>%variance</b>	<b>%variance cumulée</b>
<b>comp 1</b>	<b>4,18</b>	41,82	<b>41,82</b>
<b>comp 2</b>	<b>1,93</b>	19,30	<b>61,12</b>
<b>comp 3</b>	<b>1,54</b>	15,37	<b>76,50</b>
<b>comp 4</b>	<b>1,03</b>	10,30	<b>86,79</b>
comp 5	0,60	5,96	92,75
comp 6	0,37	3,73	96,49
comp 7	0,27	2,66	99,14
comp 8	0,05	0,47	99,61
comp 9	0,04	0,39	100,00

TABLE 5.6 – Tableau des valeurs propres

L'analyse des cercles de corrélation des 4 premières composantes nous permet de comprendre le positionnement des variables sur ces composantes ainsi que les relations entre elles. La figure 5.9 fournit des informations sur ces variables :

- La dimension 1 est principalement liée aux variables du commerce intérieur et extérieur : les pays dynamiques sur les variables de production de biens, de services, d'exportations et d'importations sont alors positionnés sur la partie droite du graphique. Il s'agit notamment de pays comme l'Irlande et Singapour.
- La dimension 2 est liée aux variables de population et population urbaine. Ainsi, les pays ayant une forte population et surtout une forte population urbaine sont situés en haut du graphique. L'Inde, la Chine et les États-Unis répondent notamment à ce critère.
- Le taux de croissance du PIB et le pourcentage du secteur agricole dans le PIB sont liés à la dimension 3. Ainsi, les pays ayant une part élevée de l'agriculture dans le PIB et une forte croissance du PIB sont situés à droite (Chine, Inde, Vietnam), tandis que les pays ayant une croissance négative et une faible part de l'agriculture sont situés à gauche (Liban, Japon, Zimbabwe).
- Enfin, la dimension 4 est essentiellement liée à la variable Industrie. Les pays ayant une part élevée de l'industrie dans l'économie sont situés en haut de la figure 5.10b (Koweït, Qatar, Oman) et, à l'inverse pour les pays ayant une faible part de l'industrie dans le PIB (Sierra Leone, Liban, Maldives).

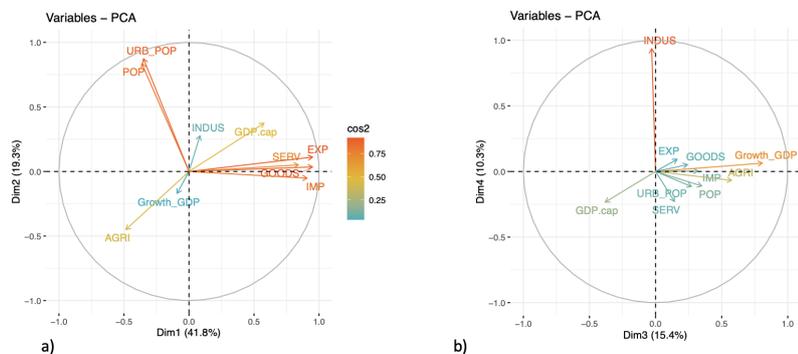


FIGURE 5.9 – Cercles de corrélations des dimensions 1-2 (a) et 3-4(b)

La classification ascendante hiérarchique réalisée sur les résultats de l'ACP ont permis de classer les pays en 5 clusters différents, représentés ci-après sur les dimensions 1 et 2 (figure 5.10a) puis 3 et 4 (figure 5.10b). Le cluster 1 (rouge) est composé de deux pays : la Chine et l'Inde. Ces deux pays sont caractérisés par : une population élevée, surtout urbaine, une part importante de l'agriculture dans le PIB et un fort taux de croissance économique. Le cluster 5 (orange), également composé de deux pays (Irlande et Singapour), se caractérise essentiellement par une activité commerciale importante. Les clusters 2 (bleu, 29 pays), 3 (vert, 39 pays) et 4 (violet, 36 pays) présentent des valeurs moyennes en ce qui

concerne les dimensions 1 et 2. Le cluster 4, cependant, se distingue par des valeurs plus élevées sur les variables commerciales (dimension 1). Le groupe 3 présente des valeurs élevées pour la variable de l'industrie (dimension 4) et pour la population (dimension 2). Le cluster 3 a également un taux de croissance économique plus faible que les clusters 2 et 4. En outre, le cluster 2 est principalement composé de pays pauvres et en développement.

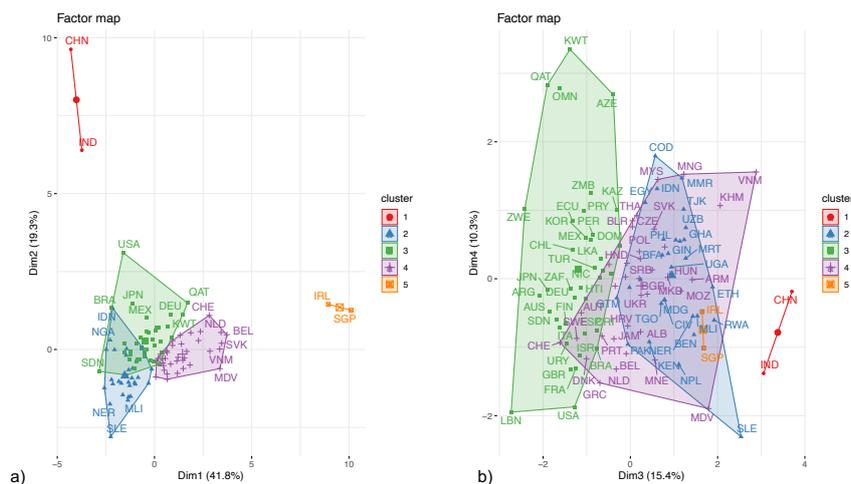


FIGURE 5.10 – Clustering représenté sur les dimensions 1-2 (a) et 3-4(b)

#### ▼ L'indicateur de mouvement : le taux de croissance de l'indicateur RISE

Pour une énergie propre à un coût abordable dans un contexte d'épuisement des ressources, de réchauffement climatique et d'inégalités croissantes dans le monde, les Nations Unies ont fixé l'Objectif de Développement Durable 7 suivant : "Assurer l'accès à une énergie abordable, fiable, durable et moderne". Les progrès réalisés par rapport à cet objectif sont analysés à travers l'indicateur RISE (Regulatory Indicators for Sustainable Energy) dont l'objectif principal est d'analyser les politiques publiques en matière d'énergie durable. Cet indicateur composite est lui-même composé des sous-indicateurs suivants : Énergies renouvelables, Efficacité énergétique, Cuisson propre et Accès à l'électricité. Sur une échelle de 1 à 100, il donne une bonne indication du niveau des infrastructures, des progrès et des politiques énergétiques d'un pays et le compare à celui d'autres pays (5.11). Le dernier rapport publié en 2020 donne les résultats obtenus en 2019 [Kennedy 2020].

Dans le cadre de l'assimilation à l'énergie cinétique, l'indicateur RISE doit représenter un mouvement. C'est donc sous la forme d'un taux de croissance de l'indicateur RISE sur la période 2010-2019 que  $\rho$  est calculé :

$$\rho = \frac{RISE_{2019} - RISE_{2010}}{RISE_{2010}} \quad (5.17)$$

Sur les mêmes 108 pays considérés dans l'ACP, nous avons examiné le score RISE afin d'établir une analyse du dynamisme politique en matière de transition énergétique. Le score RISE pour les années 2010 et 2019 a été considéré et un taux de croissance a été calculé.

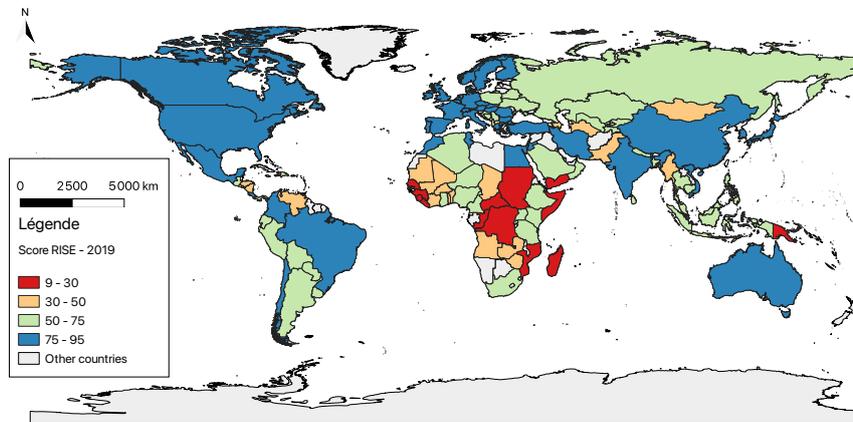


FIGURE 5.11 – Carte mondiale : score de l'indicateur RISE en 2019

Pour une meilleure lisibilité, nous divisons les pays en deux groupes : ceux dont le taux de croissance est inférieur à 1 (Figure 5.12) et ceux dont le taux de croissance est supérieur à 1 (Figure 5.13). Ainsi, on remarque que les taux de croissance les plus élevés concernent des pays ayant des scores RISE très bas en 2010, comme la Sierra Leone (SLE) ou la Guinée (GIN). Ce sont finalement les pays qui ont la plus grande marge de manœuvre en termes d'évolution politique puisque les scores sont déjà très bas. A l'inverse, les pays ayant des scores RISE élevés comme l'Irlande (IRL) et la Belgique (BEL) (58 et 57 respectivement) ont des taux de croissance plus " modestes " d'environ 0,5% sur la période (Figure 5.12).

▼ **La résilience des territoires : application de la formule de l'énergie cinétique**

Le calcul de l'énergie cinétique implique l'acquisition de deux données : une donnée de masse, permettant de décrire l'état du pays ; et une donnée de vitesse, permettant de traduire l'impulsion donnée par le choc et la capacité du pays à l'absorber. L'indicateur synthétique calculé précédemment via l'ACP est considéré comme masse et le taux de croissance de l'indicateur RISE est utilisé comme vitesse. Afin de pouvoir utiliser les données de l'indicateur synthétique dans la formule de l'énergie cinétique, les données sont normalisées entre 0 et 1 (la masse ne doit pas être négative). Les résultats obtenus sont présentés en visualisant les clusters de pays calculés précédemment (Figure 5.14).

La résilience des pays étudiés va de 0 (CHN) à 11,39 (SLE), du moins résilient au plus résilient, avec une moyenne de 1,03 et un écart-type de 2,04. On observe une forte concentration des données autour de la moyenne, ce qui implique une certaine homogénéité de la situation des différents pays. Ceci est confirmé par le calcul du coefficient d'aplatissement, qui est égal à 11,97. Pour compléter l'analyse de l'indicateur, le coefficient d'asymétrie est positif (égal à 3,37) et indique donc que la queue de la courbe de distribution est à droite



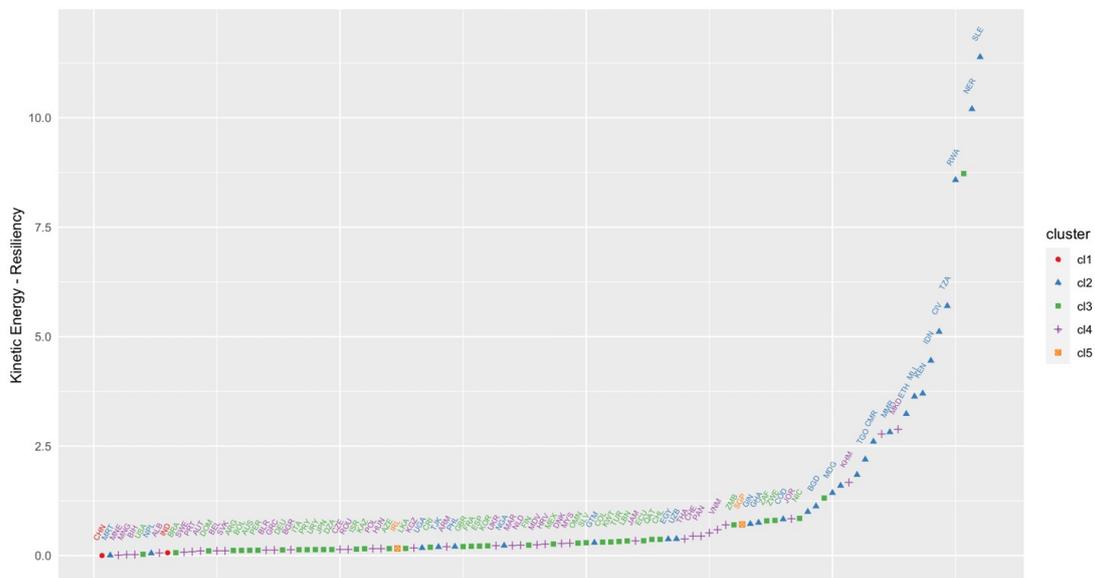


FIGURE 5.14 – La résilience des territoires - méthode Energie cinétique - Résultats

final. En effet, cette taille va peser sur le poids du pays et donc sur sa capacité à devenir résilient. Ceci est cohérent avec la définition du risque qui, en géographie, correspond à la concordance dans une zone circonscrite entre la présence d'enjeux et d'aléas. L'enjeu est lié à l'Homme et à son activité, sans lui l'enjeu n'existerait pas. Une population importante induit une augmentation des enjeux et donc du risque, augmentant ainsi la vulnérabilité du pays. Cette conclusion doit ensuite être combinée avec une analyse des mesures politiques. Un pays avec des enjeux importants (une population importante) doit donc, pour faire face à la transition énergétique, engager des moyens plus importants pour l'assurer. Ces moyens politiques, humains, technologiques et financiers, mais surtout l'absence de ces moyens pour certains pays ou l'impossibilité de les utiliser, risque d'entraîner et d'exacerber de grandes inégalités entre les pays.

Les pays présentant des scores RISE faibles apparaissent comme les pays les plus résilients de notre étude. Ce fait s'explique principalement par leur plus grande possibilité de progresser dans l'échelle RISE (qui, pour rappel, évolue de 0 à 100). Cependant, une autre hypothèse peut être avancée : les progrès en termes de politiques et d'infrastructures énergétiques sont plus faciles à réaliser en bas de l'échelle, quand tout reste à faire. Pour les pays industrialisés, économiquement forts, avec une population importante, les besoins sont plus pressants et les progrès plus lents. Cette hypothèse, si elle est vérifiée, est plutôt intéressante en termes d'analyse des inégalités territoriales entre pays. En effet, l'accès à l'énergie, et en particulier aux énergies fossiles, a accru les inégalités au niveau mondial, et la question énergétique est un facteur déterminant dans le développement d'un pays. L'indicateur RISE nous montre que les efforts consentis par les pays pourraient permettre aux pays pauvres de rattraper les pays industrialisés, réduisant ainsi les inégalités. La transition énergétique pourrait, de ce point de vue, amener tous les pays à un niveau équivalent. Toutefois, ce

niveau d'équivalence serait limité. Il s'agirait d'un rattrapage jusqu'à un certain point. Les difficultés et les obstacles que les pays développés rencontrent aujourd'hui pour mener à bien leur transition risquent d'être tout aussi, sinon plus, insurmontables pour les pays pauvres et en développement.

Une autre interprétation pourrait être tirée de ce constat. Les marges de progression pourraient être plus difficiles à établir au bout de l'échelle plutôt qu'en bas de l'échelle. On observe ainsi un effet comparable à la convergence économique, avec une croissance plus rapide pour les pays en bas de l'échelle jusqu'à arriver à un niveau de stationnarité vers lesquels convergent la plupart des pays. Cela pose la question de la possibilité réelle d'engager et de réussir/finaliser la transition énergétique. De nombreux pays se sont engagés dans cette voie depuis les chocs pétroliers avec des mesures initiales visant à limiter l'impact des énergies fossiles sur leur économie. Cependant, cinquante ans plus tard, cette transition n'a encore été pleinement réalisée par aucun pays dans le monde. Une réflexion peut alors être engagée sur l'existence de différentes étapes de la transition énergétique : il serait alors possible d'identifier des étapes séquentielles que les pays devraient atteindre de manière successive pour réussir complètement la transition énergétique. Il pourrait également être envisagé des chemins de transition différents selon les pays, voire selon des groupes de pays. Les théories des clubs de convergences seraient alors applicables. Les résultats montrant ici qu'il est plus facile d'initier la transition que de l'achever, une réflexion sur les différents types de soutien à apporter aux différentes étapes ou aux différents "clubs" pourrait également être engagée.

La méthode utilisée et les coefficients appliqués à la masse et à la vitesse pourraient peut-être expliquer ces résultats et les scores élevés de résilience des pays en développement. En effet, la formule de l'énergie cinétique fait intervenir le carré de la vitesse. Dans le principe de l'analogie, ce poids important donné à la vélocité a donc été conservé. On donne donc plus de poids à la vitesse qu'à la masse. Dans le calcul effectué ici, l'indicateur RISE prend alors plus de poids que l'indicateur synthétique de l'état du pays. Avec une plus grande marge de manœuvre pour les pays en bas de l'échelle RISE, les résultats de résilience sont alors fortement impactés. Il est alors important de vérifier l'effet marginal de chacun des paramètres par rapport à la sortie du modèle et identifier les poids à appliquer à chacun d'entre eux. On pourrait également envisager un coefficient différent selon le niveau de palier ou selon le club de convergence.

### **5.4.2 L'espace des phases**

Cette approche originale de la vulnérabilité énergétique considère que la vulnérabilité est non seulement multidimensionnelle, mais elle est surtout la caractérisation d'un système en constante évolution et interaction avec des éléments extérieurs. Cette approche devrait permettre de mieux comprendre la situation énergétique des territoires, au regard de leurs évolutions passées, et de leurs décisions présentes, et d'orienter les politiques vers des pistes pour réussir la transition énergétique.

Pour introduire les portraits de phase, il nous faut d'abord parler de *théorie des systèmes dynamiques*. En théorie des systèmes dynamiques, l'un des problèmes fondamentaux est le problème de prédiction : en connaissant les lois d'évolution, il s'agit de prévoir le comportement effectif d'un système  $x$  sur un temps long et de prévoir des phénomènes observables. Une loi d'évolution est alors une règle qui donne l'état à l'instant  $t + \delta t$  connaissant l'état à l'instant  $t$ . Cette loi peut être déterministe ou probabiliste. En prédiction déterministe, l'état futur du système est déterminé de façon unique à partir de l'état présent. En somme, le futur est déterminé par le passé. En prédiction probabiliste, l'état futur est donné par une distribution de probabilité à partir de l'état présent.

La notion d'état est complexe et doit être précisée. À ces fins, l'un des quatre paradoxes de Zénon sur le mouvement permet d'imager le problème : le paradoxe de la flèche. "*Si toujours toute chose est en repos ou en mouvement, et si elle est en repos quand elle est dans un espace égal à son volume ; comme le mobile est toujours dans l'instant (dans un espace égal à son volume), la flèche en mouvement est toujours immobile*" [Barreau 1969]. Une flèche qui vole est à chaque instant au repos. En effet, à chaque instant  $t$  de son parcours, elle est au repos, immobile. Ainsi, si on décompose le mouvement comme une succession d'instant  $t$ , il s'agit, pour la flèche, d'une succession de moments au repos. Sur ce postulat, la flèche qui vole est donc immobile. Il y a pourtant bien un mouvement effectué, ce paradoxe permet alors d'introduire la notion de vitesse instantanée qui doit être associée au mouvement. La flèche est au repos à l'instant  $t$  mais elle est en train de changer pour atteindre l'instant  $t + 1$ . On ne peut donc pas simplement considérer la flèche comme étant au repos, mais plutôt considérer qu'au même instant, elle est au repos et se prépare à changer de position. On ne peut donc pas décrire son état par une variable unique caractérisant son immobilité (variable de position) mais par un groupe de variables que l'on appelle les variables d'état : ces variables se composent donc de la position et de la vitesse, aussi appelée impulsion.

L'espace des phases va désigner l'espace permettant de représenter tous les états possibles du système considéré. En un point dans l'espace des phases, on traduit à la fois sa position et son impulsion. La position et l'impulsion sont donc les coordonnées du point dans l'espace des phases. Au cours du temps, ce point représentatif décrit une courbe dans l'espace des phases, courbe que l'on appelle trajectoire. Ainsi, pour un système possédant  $n$  degrés de liberté, par exemple, l'espace des phases  $\Gamma$  du système possède  $n$  dimensions, de telle sorte que l'état complet du système à l'instant  $t$  est en général un vecteur à  $n$  composantes. Pour obtenir la représentation géométrique de l'espace des phases, on représente  $\frac{dx}{dt}$  en fonction de  $x$ . On a alors :

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), t) \quad (5.18)$$

où  $f$  représente le système dynamique étudié. Pour un système à  $n$  degrés de liberté, on aura un champ de vecteurs  $\vec{x}$  à  $n$  dimensions, En physique, la représentation de l'évolution d'un système dans le temps se fait effectivement par une équation différentielle.

En sciences sociales, le concept de portrait de phase a été introduit pour étudier la résilience des territoires par [Dauphiné 2007]. Le portrait de phase représente la possibilité d'étudier le comportement du système-territoire. Il s'agit alors de déterminer le nombre de variables d'état du système : au minimum deux variables si l'on souhaite rester sur l'ana-

logie et garder ainsi une variable position et une variable impulsion. La représentation du portrait de phase et donc de l'ensemble des trajectoires du système permet de faire émerger l'existence de point de convergences : des attracteurs. C'est alors l'étude des bassins d'attraction de ces attracteurs qui permettra de caractériser la résilience à partir de trois indicateurs [Dauphiné 2007] :

- la taille du bassin d'attraction, appelée latitude ;
- la profondeur de l'attracteur ;
- la distance qui sépare le point figurant l'état du système de la limite la plus proche. Cette distance est appelée précarité.

Pour être résilient, le système devra donc se trouver dans un bassin de grande taille, et se positionner le plus loin possible des limites du bassin. De même, plus le bassin sera profond, plus le système aura tendance à s'en approcher et s'éloigner ainsi des limites du bassin. Pour réaliser ces analyses, il faut absolument pouvoir tracer le plan des phases. Cela signifie soit que les équations différentielles qui régissent le comportement du système sont connues, soit que les valeurs prises par le champ de vecteur  $x$  sont connues.

Dans le cas de l'étude de la vulnérabilité énergétique des territoires, nous avons mis au point une méthodologie de calcul d'indicateurs composites permettant de traduire la vulnérabilité et résilience à travers un indicateur unique. Basé sur l'analyse factorielle, cet indicateur est capable de mettre en avant pour une année donnée la caractérisation de la situation du territoire sous le prisme de l'énergie, et peut être reproduit sur plusieurs années. Nous sommes ainsi capables de produire une donnée d'état à plusieurs instants  $t$ . Pour produire la donnée d'impulsion, nous appliquons la méthode d'approximation par des différences finies en appliquant les trois équations qui suivent [Randriafeno Rajonandrianina 2022] :

Méthode progressive, pour les premiers éléments :

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 4f(x_{i+1}) - 3f(x_i)}{2h} \quad (5.19)$$

Méthode centrée :

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 8f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}{12h} \quad (5.20)$$

Méthode régressive pour les derniers éléments :

$$f'(x_i) = \frac{3f(x_i) - 4f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}{2h} \quad (5.21)$$

#### ▼ L'indicateur d'état : indicateur composite

Le travail présenté dans le cadre du colloque ASRDLF 2022 propose le calcul d'un indicateur de vulnérabilité sur un jeu de données composé de 17 espaces insulaires et 10 variables disponibles sur une période de 20 ans (1994-2014) projeté dans l'espace des phases. La méthodologie de calcul de l'indicateur composite est la même que celle employée et présentée dans la section 5.4.1 précédente.

Les variables utilisées sont présentées dans le tableau 5.7.

TABLE 5.7 – Variables utilisées pour l'ACP. Source = Banque mondiale

	Variables	Unité
GDP	Produit Intérieur Brut	\$ courants
POP	Population	
IDH	Indice de Développement Humain	
GES	Emission de gaz à effet de serre	kt
CONS.HAB	Consommation par habitant	kWh/hab
IMPORT.ENERGY	Importation nette d'énergie	% de l'utilisation de l'énergie
ELEC.ACCESS	Taux d'accès à l'énergie	%
INTENSITY.ENERGY	Intensité énergétique	
ELEC.POWER	Production d'énergie électrique	
ENR	Taux de pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique	%

Les résultats de l'ACP nous fournissent, comme précédemment, nos premiers éléments d'analyse. Sur le jeu de données étudiées, nous sélectionnons, sur la base des critères habituels présentés en amont du chapitre dans les autres études menées, les 4 premières dimensions, pour une variance expliquée totale de 87,10%. La lecture des cercles de corrélations nous fournit un certain nombre d'informations (Figure 5.15). Nous pouvons considérer, dans un premier temps, que la dimension 1, liée aux variables IDH, Accessibilité à l'électricité, consommation par habitant et production d'énergie électrique par habitant, est une dimension qui représente plutôt le développement social des territoires avec un certain niveau de confort au regard de l'accès à l'énergie. La dimension 2, quant à elle, est liée à la richesse économique qui va de pair avec la taille de la population et les émissions de Gaz à Effet de Serre. On remarque d'ailleurs qu'il y a une quasi-orthogonalité entre la variable GDP et la variable IDH. La dimension 3 sera caractérisée par les importations d'énergie, représentant ainsi le niveau de dépendance des territoires au regard de l'extérieur. Enfin, la dimension 4 représente l'intensité énergétique, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'énergie utilisée et le PIB. Une valeur forte sur cette dimension indique donc une économie énérgivore par unité.

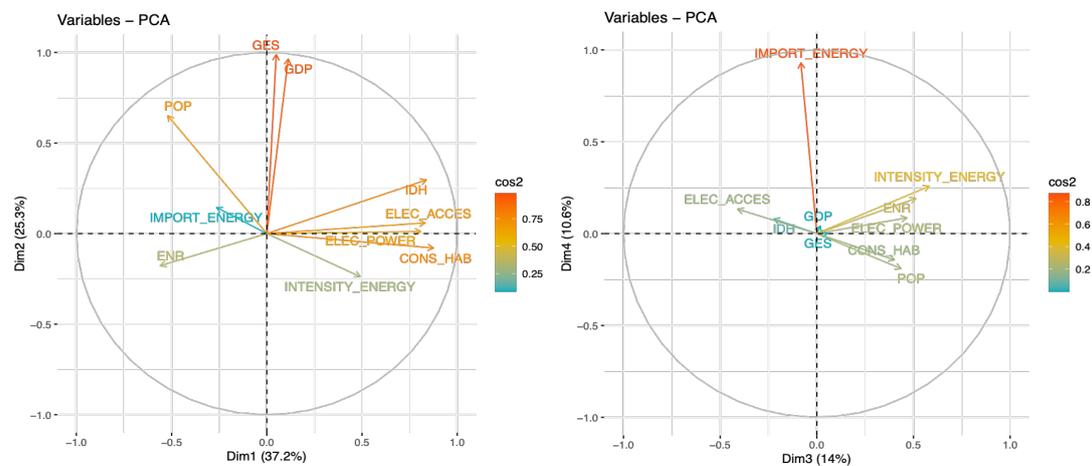


FIGURE 5.15 – Résultats de l'ACP - Cercles de corrélation

La construction de l'indicateur composite se fait avec la même méthode que présentée dans les sections précédentes. La Figure 5.16 présente les résultats sur une période de 20 ans pour les 17 territoires étudiés. À droite du graphique, sont signalés, en vert, les territoires qui ont connu une augmentation de leur indicateur sur la période.

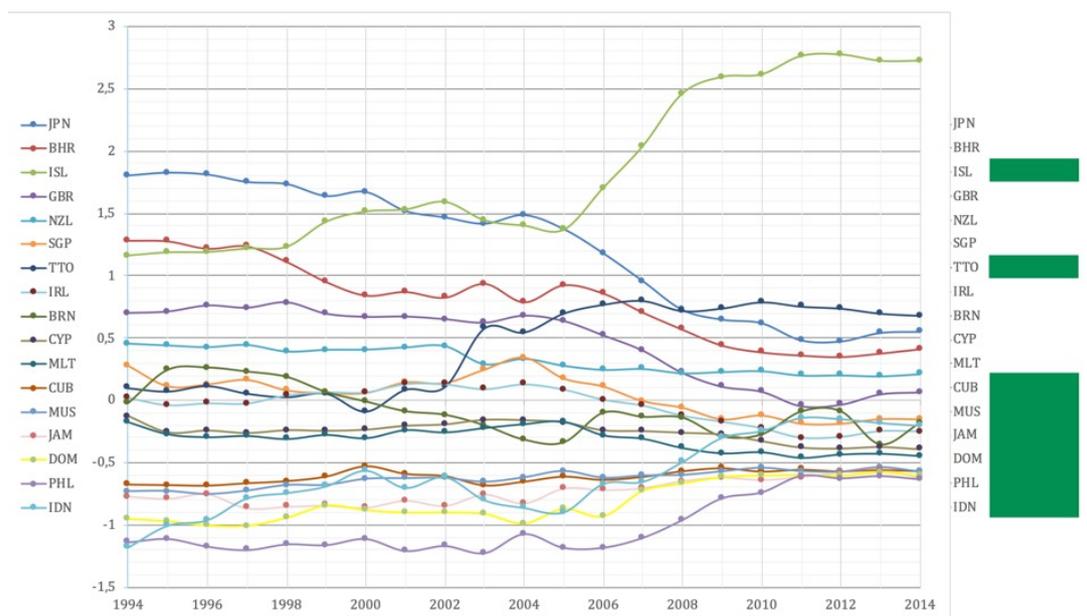


FIGURE 5.16 – Indicateur composite calculé - Evolution 1994-2014

L'indicateur varie, sur le jeu de données, entre -1,22 et 2,77, du plus vulnérable au moins vulnérable. Les pays qui se démarquent avec une forte évolution de leur indicateur sur la période sont l'Islande (ISL, en vert sur le graphique), Trinidad et Tobago (TTO, en bleu nuit sur le graphique) et enfin l'Indonésie (IDN, en bleu ciel sur le graphique). Le premier, l'Islande, est de moins en moins vulnérable grâce à des importations d'énergie divisées par 3 sur la période étudiée, réduisant ainsi la dépendance envers l'extérieur, une augmentation des énergies renouvelables dans le mix électrique, traduisant un effort en termes d'énergie durable et d'autonomie énergétique, et un niveau d'émissions de GES très bas, associé à une population faible également. Pour les deux autres pays connaissant une forte progression sur la période, les raisons sont tout autres : Trinidad et Tobago et l'Indonésie sont de gros exportateurs d'hydrocarbures pour le premier et de charbon pour le second, ce qui crée une situation d'indépendance énergétique forte. La part des énergies renouvelables dans le mix électrique est faible et diminue même dans le cas de Trinidad et Tobago mais le dynamisme économique entraîne un indicateur fort. L'aspect multidimensionnel de l'indicateur montre bien la diversité des situations énergétiques des territoires et l'importance d'une vision non plus statique, mais dynamique de la vulnérabilité énergétique.

#### ▼ Représentation du portrait de phase

En appliquant, pour chaque territoire étudié, les formules présentées précédemment pour le calcul de  $dx/dt$  (équations 5.19, 5.20 et 5.21), nous obtenons une trajectoire projetée sur 20 années pour les 17 territoires. Afin de représenter ces trajectoires, nous choisissons de représenter la densité de points à travers la méthode d'estimation par noyau. C'est une méthode non paramétrique d'estimation de la densité de probabilité d'une variable aléatoire qui nous apporte deux avantages dans la représentation de nos trajectoires : (1) nous visualisons les zones les plus denses, c'est-à-dire les zones où la probabilité de retrouver des points d'état est la plus élevée et (2) il y a lissage effectué entre les différentes zones de densité afin de combler les "vides".

Nous obtenons ainsi le portrait de phase suivant, sur lesquels nous avons choisi de représenter quelques points spécifiques (Figure 5.17) :

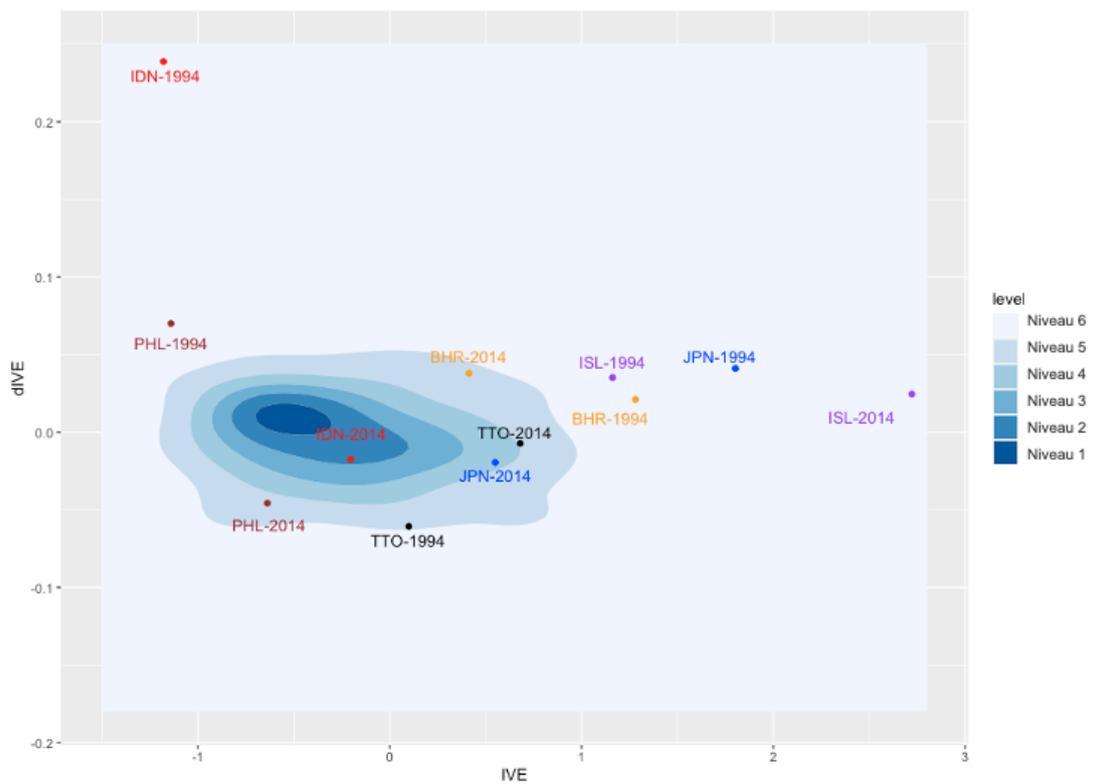


FIGURE 5.17 – Représentation des trajectoires de pays dans l'espace des phases : densité de points

Le graphique représente ainsi des aires de densité allant du niveau 1 à 6, 6 étant le niveau de densité le plus faible. La représentation sur ce graphique de quelques points représentatifs nous permet d'apporter un certain nombre d'observations :

- Le cas de l'Islande, sur lequel nous nous sommes attardés plus haut, nous montre une Islande positionnée en zone 6 en 1994 et en 2014, mais qui tend à s'éloigner au plus loin de la zone 5. On assimilera donc la zone 6 à la zone contenant les pays les moins

vulnérables.

- Les cas de l'Indonésie et de Trinidad et Tobago sont moins évidents. Ils se déplacent en effet vers les zones plus denses.
- Les cas du Japon (JPN) et du Bahrein (BHR) qui voient leur indice fortement chuter entre 1994 et 2014 se traduit sur le portrait de phase par un déplacement vers les zones plus denses.
- Le cas des Philippines (PHL) est également projeté. Affichant le niveau d'indice le plus bas sur la période, le territoire se déplace de la zone 6 vers la zone 5.

De ces observations, la première conclusion est la suivante : le comportement du portrait de phase représenté par une densité de points ne permet pas d'apporter une lecture telle qu'ambitionnée par [Dauphiné 2007]. En effet, la représentation permet d'avoir une lecture inverse : la zone de concentration étant la zone la plus vulnérable. De ce constat, plusieurs éléments viennent s'ajouter. Tout d'abord, les zones les plus vulnérables sont plus petites que les zones les moins vulnérables. Cela peut amener une conclusion : les pays vulnérables le sont pour des raisons très similaires, tandis que pour basculer dans un état de faible vulnérabilité, il existe une grande variabilité des situations. Ainsi, il existerait plusieurs chemins pour atteindre une situation de moindre vulnérabilité. Si ce postulat est confirmé, une suite de ce travail pourrait être la caractérisation des différentes situations possibles pour appartenir aux zones les moins vulnérables. Ensuite, un deuxième postulat pourrait être avancé : l'immobilité dans une zone, ou l'évolution d'un territoire vers des zones moins vulnérables ou plus vulnérables, pourrait renseigner sur la capacité du territoire à encaisser un choc. Son immobilité ou sa progression vers des zones plus vulnérables pourraient traduire une faible capacité de résistance au choc de la transition énergétique. Étudier ainsi le comportement des variables d'état en faisant évoluer certains paramètres d'entrée pourraient ainsi nous renseigner sur cette capacité de résistance.

## 5.5 Conclusions préliminaires et projets de développement

L'étude de la vulnérabilité énergétique des territoires occupe une partie prépondérante dans mes travaux de recherche depuis 9 ans. Je me suis tout d'abord concentrée sur les territoires insulaires et j'ai ainsi développé une expertise sur la question de l'insularité au regard de la transition énergétique et du réchauffement climatique. Dans mes travaux, différentes dimensions spatiales de la vulnérabilité énergétique ont été appréhendées à travers l'application de plusieurs instruments analytiques et méthodologiques sur des données multivariées. Testées en premier lieu sur les espaces insulaires, les méthodologies et analyses pratiquées ont été élargies à l'échelle internationale. Cet élargissement a permis, dans un premier temps, de valider des méthodologies d'analyse innovantes dans l'étude de la question énergétique à l'échelle de pays. L'existence de données abondantes et robustes constituent un avantage considérable dans le test des méthodologies. L'identification des biais méthodologiques ou des éléments déterminants dans l'analyse seront utiles pour

la reproduction des méthodes sur une échelle plus fine, notamment celle des territoires insulaires. Dans un second temps, la constitution d'une base de données et d'analyses élargies permet d'apporter un certain nombre de conclusions utiles à la compréhension de la situation des territoires insulaires. Dans cette démarche comparative qui est la mienne, la question de la donnée est, en effet, un enjeu majeur. Enfin, le travail sur une échelle internationale a permis de faire émerger un certain nombre de constats qui aideront à la compréhension des espaces insulaires.

La première chose à souligner est la grande diversité des situations énergétiques des pays. En effet, l'énergie est au cœur du développement économique des territoires et il y a eu au fil des siècles une rupture marquée entre pays du nord et pays du sud dans l'accessibilité à l'énergie. Ainsi, cette diversité qui conduit à des situations d'inégalités fortes génère des besoins différents dans l'approche de la transition énergétique. Néanmoins, malgré la grande diversité des situations, un consensus se dessine : l'indépendance énergétique permet de diminuer la vulnérabilité énergétique. Cette indépendance est possible à travers deux profils : la présence de ressources fossiles permettant au territoire d'être exportateur, ou des investissements marqués dans les énergies renouvelables permettant une forte progression dans le mix électrique. Une même situation, l'indépendance énergétique, mais deux profils différents et deux stratégies politiques énergétiques différentes. Il faut noter néanmoins que les pays exportateurs d'énergies fossiles s'exposent à une vulnérabilité plus forte en cas d'épuisement de la ressource.

Une distinction évidente existe et est confirmée dans les travaux entre pays développés et pays en développement. Les pays développés, soutenus par une économie dynamique, apparaissent moins vulnérables que les pays en développement. Néanmoins, cela est conditionné par un mode de vie non énergivore et par des investissements dans les énergies renouvelables. L'exemple du Bahreïn, qui présente un fort dynamisme économique, mais présente un mode de vie très énergivore et donc une forte vulnérabilité, illustre bien ce fait. Cela permet ainsi de réfléchir sur le modèle économique de la croissance, sur les bases du développement économique d'un territoire. Les pays développés ont plus de cartes à jouer pour assurer la transition énergétique, mais ceux-ci doivent s'assurer d'un mode de vie sain et de la mise en place de politiques en faveur du développement des énergies renouvelables. L'analyse des efforts politiques réalisés à partir de l'indicateur RISE présenté dans l'analogie entre résilience énergétique et énergie cinétique montre qu'il existe un effet de convergence économique dans les progrès en faveur de la transition énergétique. Les pays développés connaissent une certaine stagnation tandis que les pays en développement augmentent rapidement leur score RISE. Ainsi, la transition énergétique pourrait provoquer un effet de rattrapage entre pays développés et pays en développement.

L'effet de convergence constaté permet d'envisager l'existence d'effets de paliers dans le chemin vers la transition énergétique. Ce constat, tiré des travaux sur l'énergie cinétique, montre ainsi la possibilité de tracer des objectifs de politique différents selon les paliers et ainsi construire une approche progressive pour atteindre et achever la transition

énergétique. Une autre explication possible réside dans l'existence de clubs de convergence. Il ne s'agirait donc plus de paliers de transition énergétique, mais de chemins différents dépendants de caractéristiques d'état initial des territoires.

Enfin, une dernière conclusion porte sur les besoins énergétiques. Le cas de l'Islande est assez révélateur : une faible population, un développement poussé des énergies renouvelables leur permettant de maintenir le niveau d'importations d'énergies et d'émissions de GES à un niveau bas. L'Islande se présente comme un territoire peu vulnérable, indépendant d'un point de vue énergétique et présentant peu de besoins. La taille de la population, la structure de l'économie et la capacité à développer les énergies renouvelables semblent donc déterminants dans la vulnérabilité énergétique.

### **Projets de développement**

L'ensemble de ces conclusions doit être éprouvé et les outils d'analyses et méthodes vont être reconduits à des échelles plus fines. Deux verrous méthodologiques devront être levés à l'avenir :

- Comment créer un indicateur de vulnérabilité énergétique en éliminant toutes subjectivités ? La méthode ACP, bien que satisfaisante dans sa capacité à analyser une quantité importante de données multidimensionnelles, reste biaisée par l'importance du jeu de données en entrée. D'un jeu à un autre, les dimensions de la vulnérabilité n'apparaissent pas sous le même prisme. La méthode analogique à l'énergie cinétique a également montré des effets biaisés, notamment par les coefficients de calculs appliqués.
- Existe-t-il une spécificité insulaire dans l'approche de la vulnérabilité énergétique ? Mes travaux généralisés à une échelle internationale élargie n'ont pas mis en exergue, à ce jour, de caractère spécifique aux îles.

Mes travaux tentent de démontrer des phénomènes territoriaux/sociétaux à partir de théories mathématique et physique. L'analyse des territoires est complexe parce que le territoire est complexe, agrégeant plusieurs dimensions à la fois physique, géographique, économique, historique, mais aussi sociale et sociétale. La multidisciplinarité dans la prise en compte des phénomènes impactant le territoire est donc primordiale pour s'approcher de la réalité. Ainsi, dans cette optique, je souhaite continuer mon approche par analogie aux sciences physiques. En effet, de nombreuses théories des sciences physiques semblent pouvoir coller à la problématique étudiée. À l'image de l'économie géographique et urbaine, je souhaite ainsi continuer à explorer cette voie. La question de l'aspect dynamique par exemple doit être poursuivie en identifiant notamment le modèle dynamique adapté à l'analyse de la vulnérabilité énergétique. Des modèles ont déjà été testés dans le cadre des travaux de thèse de Mme Laurencia Randriafero Rajonandrianina : théorie du chaos, équations de prédation de Lotka-Volterra. Un projet de thèse est en cours de développement et prendra ainsi la suite directe de ces premiers travaux.

En termes méthodologiques, mes travaux vont poursuivre dans une démarche d'analyse de données multivariée. Un de mes objectifs est de réduire la subjectivité dans les modèles

appliqués. Les pistes méthodologiques m'orientent vers les modèles d'économétrie spatiale, d'analyse d'incertitude ou encore d'analyse de sensibilité. L'objectif est d'identifier les variables les plus significatives dans l'expression de la vulnérabilité énergétique. L'analyse des déterminants de la vulnérabilité énergétique implique donc d'identifier les effets marginaux constatés par l'évolution des variables d'entrée des modèles utilisés.

Mes travaux sur l'approche épistémologique de la vulnérabilité énergétique vont également être poursuivis. Afin d'envisager une vision globale des concepts de vulnérabilité, résilience et soutenabilité, une approche de type *text mining* est envisagée dans de futurs travaux sur la théorisation des concepts.

▼ **PROJET DE THESE – DE L'UTILITÉ DE L'ESPACE DES PHASES POUR L'ÉTUDE DE LA VULNÉRABILITÉ ÉNERGÉTIQUE DES TERRITOIRES : CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DYNAMIQUE**  
**RÉSUMÉ** – Les villes et territoires sont de plus en plus assimilées à des systèmes complexes qu'il convient d'étudier avec les outils adaptés. La dynamique des systèmes est un de ces outils, mais peu d'études se sont lancées dans cette entreprise tant le système *TERRITOIRE* est complexe. Une première thèse a permis de poser les bases de l'analogie à la dynamique des systèmes pour l'étude de la vulnérabilité énergétique des espaces insulaires. La construction d'un indicateur multidimensionnel et sa traduction dans l'espace des phases a permis une lecture à la fois spatiale et temporelle de la problématique. L'objectif de ce nouveau travail est la définition d'un modèle type d'analyse : identifier les modèles dynamiques les plus représentatifs de la vulnérabilité énergétique. L'intérêt méthodologique repose sur la définition des conditions initiales, des attracteurs et de leurs bassins, ainsi que de l'évolution du système en leur sein. Cette approche originale de la vulnérabilité énergétique considère alors que la vulnérabilité est non seulement multidimensionnelle, mais elle est surtout la caractérisation d'un système en constante évolution et interactions avec des éléments extérieurs. Cette approche devrait permettre de mieux comprendre la situation énergétique des territoires, au regard de leurs évolutions passées, et de leurs décisions présentes, et d'orienter les politiques vers des pistes pour réussir la transition énergétique.

## 5.6 Travaux de référence de cette partie

### ▼ Revues internationales avec comité de lecture

- ART.[1] **Bénard, F.**, (2022). Vulnerability and resilience : an attempt to theorize, *Advances in environmental and Engineering research, Special Issue : Energy, Urban planning and sustainable Development*. 3(4). doi :10.21926/aeer.2204045.
- ART.[2] Praene, J.P., Payet, M., **Bénard-Sora, F.**, (2018). Sustainable transition in small island developing states : Assessing the current situation. Volume 54, October 2018, Pages 86-91 *Utilities Policy* .

- ART.[3] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J. P., (2016). Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 636-648.

▼ **Colloques et congrès internationaux avec comité de lecture**

- ACT.[1] Randriafeno Rajonandrianina, L., **Bénard, F.**, 2022. La vulnérabilité des territoires insulaires, proposition d'une approche dynamique. **58<sup>e</sup> colloque ASRDLF**, 29, 30 juin et 1er juillet, Rennes, France.
- ACT.[2] Vélia, F., **Bénard, F.**, 2022. Le tout-voiture, vecteur des inégalités socio-spatiales à la Réunion : vers une mobilité plus douce? **58<sup>e</sup> colloque ASRDLF**, 29, 30 juin et 1er juillet, Rennes, France.
- ACT.[3] Praene, J. P., **Bénard, F.**, 2019. Pathways for sustainable transition for European countries : A statistical analysis, **12<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection**, Sharjah, United Arab Emirates.
- ACT.[4] Praene, J. P., **Bénard, F.**, 2019. The ongoing energy transition : A comparative analysis of SIDS and European ultraperipheral islands, **3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change**, Mauritius.
- ACT.[5] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J.-P., 2017. Les Petits Etats Insulaires en Développement face au défi de la transition énergétique : entre forces et faiblesses, étude de leur vulnérabilité. **54<sup>e</sup> Colloque de l'ASRDLF** : "Cities and regions in a changing Europe : challenges and prospects", 5-7 juillet, Athènes, Grèce.

# La transition énergétique : politiques territoriales en milieu insulaire

---

## Sommaire

<b>6.1</b>	<b>Les milieux insulaires face à la transition énergétique : diagnostic territorial</b>	<b>107</b>
6.1.1	Le milieu insulaire, un milieu spécifique	107
6.1.2	Évaluation des besoins du territoire : les déterminants de la consommation énergétique à l'échelle communale	112
6.1.3	Estimation de la demande énergétique : ratios de consommation à l'échelle du bâtiment	115
6.1.4	Transport durable : diagnostic pour une mobilité vertueuse	119
6.1.5	Synthèse	127
<b>6.2</b>	<b>Évaluation des politiques publiques en matière de transition énergétique : analyse du cas de l'île La Réunion</b>	<b>128</b>
6.2.1	La planification énergétique	128
6.2.2	La mesure des effets des politiques de transition énergétique sur les ménages	133
6.2.3	Les projets d'aménagements durables, outils de la transition énergétique	138
6.2.4	La gestion durable des déchets plastiques	141
<b>6.3</b>	<b>Conclusions du chapitre et projets de développement</b>	<b>147</b>
<b>6.4</b>	<b>Travaux de référence de cette partie</b>	<b>150</b>

---

Sur la scène internationale, depuis le Sommet de la Terre à Rio en 1992, les Nations Unies mettent en lumière les conséquences du réchauffement climatique, notamment à travers la Conférence des Parties (COP). Ces hauts lieux d'échange ont permis de nombreuses avancées en matière de lutte contre le changement climatique et ont vu la signature d'engagements internationaux tels que le protocole de Kyoto ou les accords de Paris. Ces conférences et accords ne font pas l'unanimité sur la scène internationale, mais permettent aux questionnements quant aux conséquences du réchauffement climatique d'occuper une place sur la scène mondiale [Bénard-Sora 2018b].

Au niveau européen, les préoccupations climatiques ont vite amené le débat sur les questions énergétiques. La politique énergétique de l'Union européenne peut être résumée en trois grands domaines. Le premier est la question de la sécurité énergétique, qui encourage la diversification des sources d'approvisionnement afin de limiter la vulnérabilité globale. Le deuxième est la question des objectifs environnementaux (par exemple, les objectifs du protocole de Kyoto, les objectifs du programme Europe 2020). Ce deuxième point est axé spécifiquement sur l'autosuffisance énergétique, l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau et le développement de réseaux intelligents. Le dernier point concerne la compétitivité économique du secteur énergétique (par exemple, la libéralisation du marché, l'accessibilité financière) [Chevalier 2009]. Sous la direction de la France, l'Europe s'est engagée, depuis 2008, dans un "paquet" Énergie-Climat, qui est un instrument législatif dédié à l'augmentation de l'efficacité énergétique et de l'utilisation des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La France s'est engagée à respecter les objectifs du protocole de Kyoto depuis 2004, date à laquelle son premier plan climat national a été présenté. Dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'est fixé comme objectif de stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre avec des mesures de réduction des émissions de carbone dans tous les secteurs de l'économie et de la vie quotidienne. En France, une particularité est le caractère public de la politique énergétique. Celle-ci assure l'indépendance stratégique de la nation, favorise la compétitivité économique et repose sur le maintien et le développement d'entreprises publiques nationales et locales dans le secteur de l'énergie. L'énergie est en effet considérée comme un besoin d'intérêt général. La cohérence territoriale et la connexion entre les différents niveaux administratifs du territoire est un enjeu majeur pour réussir la transition énergétique.

Ce chapitre se concentre sur cette ambition de réussite de la transition énergétique en analysant notamment les capacités des territoires insulaires à assumer cette transition. Deux approches sont proposées : une approche diagnostique, dans un premier temps, afin de mettre en exergue les forces et faiblesses du territoire insulaire, celui de La Réunion plus précisément (section 6.1); et une approche évaluative, dans un second temps, afin de vérifier la pertinence des ambitions internationales et nationales au niveau local (section 6.2).

## 6.1 Les milieux insulaires face à la transition énergétique : diagnostic territorial

Le diagnostic territorial est une étape de la démarche de projet. Dans le cadre de l'application de politiques publiques en matière de transition énergétique, la lecture des forces et faiblesses d'un territoire à travers la réalisation d'un diagnostic est essentielle. Cette partie s'attache à cette étape préalable à la mise en œuvre de politiques publiques. En considérant quatre échelles d'analyses, cette section parcourt les enjeux de la transition énergétique sous différents angles :

- La production d'électricité renouvelable en milieu insulaire : quelles sont les défis de la progression de la part des énergies renouvelables dans le mix électrique en milieu insulaire ? Le cas de l'île de La Réunion et de l'archipel des Comores est étudié (section 6.1.1).
- La consommation d'électricité à l'échelle communale : quels sont les déterminants de la consommation d'électricité ? Les parts résidentielles, industrielles, tertiaires et agricoles sont analysées sur l'ensemble des communes de La Réunion (section 6.1.2).
- La consommation d'électricité à l'échelle du bâtiment : comment produire un ratio de consommation d'électricité par typologie de surface bâtie (section 6.1.3) ?
- Le transport et la mobilité vertueuse : quels sont les défis à relever ? La mobilité et le transport sont-ils vecteurs d'inégalités sur le territoire (section 6.1.4) ?

### 6.1.1 Le milieu insulaire, un milieu spécifique

Le déploiement des énergies renouvelables sur les territoires insulaires isolés représente un enjeu économique important. Ces territoires fragiles sont souvent des territoires sous-développés et la question du déploiement est donc un enjeu majeur de développement. Cependant, les obstacles à ce développement sont importants. Dans une étude sur les PEID, Weisser en a identifié trois principaux axes sur les capacités du territoire : les capacités humaines et institutionnelles, les capacités financières et la connaissance des technologies [Weisser 2004a]. Les barrières peuvent être des obstacles au développement des énergies renouvelables, mais peuvent aussi être des barrières spécifiques à une énergie particulière ou une technologie, ainsi que des barrières spécifiques au territoire [Painuly 2001]. En 2001, Painuly a passé en revue l'ensemble des barrières au déploiement des énergies renouvelables dans un territoire. Sept grandes catégories ont été identifiées. Dans le cadre de mes travaux, l'existence de ces barrières a été analysée au sein de deux espaces insulaires de la zone Océan Indien : l'île de La Réunion [Bénard-Sora 2016, Bénard-Sora 2018b] et l'archipel des Comores [Praene 2021]. La vérification de ces barrières dans le cadre des travaux sur l'île de La Réunion a été réalisée dans l'objectif d'identifier la capacité du territoire à assurer la transition énergétique. L'une des questions préliminaires à poser concernait la possibilité d'une indépendance énergétique du territoire, pour une Région Ultra-Périphérique européenne et bénéficiant des institutions françaises et européennes. Dans le cadre des travaux sur les Comores, archipel indépendant classé parmi les pays les moins avancés (PMA) depuis

1977 [Nations Unies 2021], l'objectif était d'identifier la possibilité d'un mix électrique 100% renouvelable sur le territoire.

Dans la partie qui suit, nous passerons en revue, les sept barrières identifiées dans les travaux de [Painuly 2001] en s'appuyant sur l'exemple de La Réunion et des Comores.

### **Les barrières liées au marché**

Les deux premiers types de barrières identifiées sont directement liés au marché : son échec, ses imperfections et distorsions. Les exemples associés à ces barrières sont nombreux : manque d'infrastructures, absence de concurrence sur le marché (situation de monopole notamment), secteur énergétique contrôlé, taxes sur les nouvelles technologies, etc. [Painuly 2001]. Le premier niveau de barrière fait référence à l'absence des conditions requises pour un état concurrentiel fort du marché. Parmi ces conditions, on peut citer notamment l'atomicité du marché, qui signifie qu'aucun agent économique n'a suffisamment de poids sur le marché pour pouvoir le contrôler. On peut également citer l'homogénéité des produits, qui indique que seul le critère du prix est prépondérant dans la différenciation des produits, ou encore la libre entrée sur le marché, la transparence du marché et la mobilité des facteurs de production travail et capital. Appliquées au déploiement des énergies renouvelables sur un territoire, ces barrières font référence au contrôle élevé du secteur de l'énergie, à l'accès restreint aux technologies, au manque de concurrence et aux exigences élevées en matière d'investissement [Painuly 2001].

Le second niveau fait référence à la taille du marché, au capital (accès et coût élevé), au manque d'institutions financières pour soutenir les énergies renouvelables, ... Le déploiement des ENR sur un territoire est coûteux, et l'investissement privé est nécessaire. Cependant, la petite taille du marché peut décourager l'investissement à cause du risque sur la rentabilité. Le risque financier à supporter par un investisseur est l'un des principaux obstacles au déploiement des énergies renouvelables sur un territoire [Sen 2017].

L'analyse de l'archipel des Comores, sur ces premiers types de barrière, permet de constater rapidement le manque ou plutôt l'absence totale de concurrence sur le territoire [Praene 2021]. Le secteur de l'énergie et en particulier la production d'énergie est fortement contrôlé par l'Etat depuis 1976. Seules deux entreprises existent sur le territoire et ce sont des entreprises publiques : la Gestion de l'Electricité aux Comores (MAMWE) pour la Grande Comore et Mohéli et Electricité d'Anjouan (EDA) pour Anjouan [Nations Unies 2017a]. Ce sont les deux seules entreprises qui régulent le marché de l'énergie [Praene 2021]. Concernant l'Île de La Réunion, les centrales électriques appartiennent à cinq entités différentes : publiques et semi-publiques avec la Région Réunion et EDF et privées avec Albioma, Veolia et Quadran. EDF est le producteur et fournisseur historique de l'île, ce qui lui confère une place hégémonique sur le marché. Ce nombre limité d'acteurs fragilise le marché [Bénard-Sora 2018b].

### **Les barrières économiques et financière**

Le nombre d'acteurs limités sur le marché fausse un marché qui, de plus, présente des failles économiques et financières (troisième catégorie de barrière identifiée dans le travail de Painuly). L'archipel des Comores est composé de trois îles qui couvrent une superficie

de 2,236  $km^2$  pour une population de plus de 500.000 habitants. Par conséquent, l'archipel offre un marché économique de petite taille qui non seulement empêche la possibilité de réaliser des économies d'échelle, mais limite également la multiplication des producteurs et donc la concurrence. La taille du marché ne permet pas non plus d'encourager les investisseurs extérieurs sur la base d'un simple argument économique. C'est donc avec un autre argument que les Comores parviennent à attirer les investisseurs : en effet, étant membre de la Ligue des États arabes, l'archipel bénéficie d'investissements importants par ce biais. Ces investissements pourraient soutenir un marché des énergies renouvelables qui n'est pas rentable d'un point de vue purement économique [Praene 2021]. À La Réunion, avec 835 000 habitants, 341 000 foyers et 75 000 entreprises en 2013, le marché est petit et la pénétration des nouvelles technologies de production d'énergie présente des risques importants. Pour faciliter cette pénétration, il convient de s'interroger sur les risques réels : les pouvoirs publics pourraient par exemple proposer des incitations aux entreprises privées pour réduire l'ampleur des risques qu'elles encourent [Bénard-Sora 2018b].

### Les barrières institutionnelles

La quatrième barrière est institutionnelle. Le développement des énergies renouvelables dans une région nécessite un cadre institutionnel favorable. Les barrières institutionnelles peuvent ainsi être diverses : manque d'institutions-mécanismes de diffusion de l'information, manque de cadre légal-réglementaire, environnement macro-économique instable, manque d'implication des parties prenantes dans la prise de décision, conflit d'intérêts, manque de culture de la Recherche et Développement, manque de participation du secteur privé, et manque d'institutions professionnelles [Bénard-Sora 2018b]. Dans le cas des Comores, cette barrière est présente. Le secteur de l'électricité souffre de plusieurs lacunes : une gouvernance faible et des réformes politiques limitées, un manque de transparence concernant le budget dédié au secteur, un manque de responsabilité et d'autonomie des entreprises [Union des Comores 2013]. Néanmoins, depuis quelques années, on constate un engagement politique en faveur des énergies renouvelables. Depuis 2012, l'Union des Comores réforme le secteur de l'énergie avec la stratégie nationale du secteur de l'énergie de 2012 [Nations Unies 2017a]. Des mesures politiques fortes ont déjà été prises pour encourager les entreprises à adopter les énergies renouvelables. Les contributions intentionnelles déterminées au niveau national en 2015 ont identifié des mesures clés pour le déploiement des énergies renouvelables. Avec l'objectif global de contribuer à la réduction de la pauvreté et au développement durable, l'Union des Comores cherche à apporter des solutions adéquates aux défis du réchauffement climatique [Union des Comores 2015, Nations Unies 2017a]. L'État est également signataire de la COP 21, qui consacre cet engagement en faveur des énergies renouvelables. Néanmoins, le pays souffre d'une gestion à court et moyen terme qui ne permet pas un développement stable du secteur. De plus, l'abondance de fonds provenant de sources extérieures (via la diaspora comorienne ou l'appartenance à des groupes d'alliance économique tels que la Ligue des États arabes ou la Commission de l'océan Indien), bien que nécessaire au développement du pays, entraîne une situation de forte dépendance vis-à-vis de l'État et freine l'adoption de plans à long terme [Praene 2021]. Concernant La Réunion, plusieurs points cruciaux doivent être pris en compte pour défier

la transition énergétique. Un premier aspect concerne la politique d'incitation par le biais de taxes ou de tarifs de rachat pour encourager les investissements dans les énergies renouvelables. Un autre point crucial concerne l'acceptation sociale par la population. Le gouvernement français a réduit les programmes nationaux de tarifs de rachat pour le photovoltaïque (PV) et les chauffe-eau solaires (CES) depuis 2011. La conséquence immédiate est le manque d'incitation pour les crédits Energies renouvelables pour les consommateurs, impliquant ainsi la baisse des investissements privés [Bénard-Sora 2018b]. Après avoir connu un beau dynamisme entre les années 1990 et 2010 avec plus de 565 000  $m^2$  de panneaux CES<sup>1</sup> installés, favorisé par une exonération fiscale de l'Etat, les CES et panneaux photovoltaïques stagnent depuis un certain nombre d'année, depuis que l'Etat a réduit ses aides. Néanmoins, outre les politiques incitatives, la réglementation thermique en vigueur sur l'île (RTAADOM) veille à la construction de nouveaux logements et impose d'avoir recours à l'énergie solaire pour la production d'eau chaude afin de couvrir au moins 50% des besoins du logement.

### Les barrières techniques

La cinquième catégorie d'obstacles comprend tous les obstacles techniques : du manque d'infrastructures au manque de main-d'œuvre qualifiée [Painuly 2001]. La Réunion dispose d'une production d'électricité diversifiée, avec de nombreux sites de production sur l'île. Ces installations, bien que très diversifiées, sont centralisées par EDF puis redistribuées via le réseau électrique aux consommateurs. À l'instar des quartiers durables, il pourrait être intéressant, voire nécessaire, d'envisager une production plus locale et plus proche des consommateurs. La population est concentrée sur certaines parties de l'île : les 2/3 sont localisés sur la ceinture côtière. Ce constat devrait permettre le déploiement de certaines installations. En effet, les hautes terres de La Réunion correspondent au Parc National qui a été classé en 2009 au patrimoine mondial de l'UNESCO. Cette zone qui couvre une surface de plus de 100 000 ha, soit 40% de la Réunion, ne peut accueillir aucune installation d'énergie renouvelable (à l'exception de l'hydraulique qui était déjà existante). Le déploiement des énergies renouvelables est ainsi limité sur l'île : zones côtières et mi-hauteur, avec l'avantage de permettre une production renouvelable assez proche du consommateur [Bénard-Sora 2018b]. Cela pourrait avoir plusieurs avantages :

- diminuer les pertes dues au transport et à la distribution [Dugan 2001, Gil 2008, Mendez 2006, Akorede 2010, Poudineh 2014];
- réduire les émissions de gaz à effet de serre [Chiradeja 2004, Tsikalakis 2007, Akorede 2010];
- minimiser l'impact sur l'utilisation des terres et sur la santé [Akorede 2010];
- réduire la consommation de l'utilisateur en le conscientisant sur sa consommation (effet de proximité) [Dobigny 2009].

L'archipel des Comores est classé parmi les pays les moins avancés (PMA) depuis 1977 [Nations Unies 2021]. De plus, le territoire est très disparate : le territoire subit une

---

1. Chauffe-eau solaire

pression démographique importante et la population s'installe sur les terres encore disponibles. Certaines régions atteignent 1000 *habitants/km<sup>2</sup>* comme Nyumakele (Anjouan) [Abdallah 2009]. La population s'est installée sur le grès de l'histoire et des opportunités géographiques. En corollaire, 60% de la population vit en milieu rural en 2015 [Nations Unies 2017a]. Cette situation engendre des difficultés techniques dans le transport de l'électricité. En 2016, seulement 77,84% de la population était raccordée à l'électricité. L'ensemble de la population n'a pas accès à l'électricité et pourtant les installations existantes ne sont pas suffisantes pour répondre à la demande de la population raccordée au réseau. Il existe en effet des périodes de rupture de stock dues à un manque de capacité de stockage des hydrocarbures alimentant les centrales électriques. A cette contrainte purement structurelle s'ajoute une contrainte culturelle avec le constat d'un certain conflit entre les différentes îles, entraînant des dysfonctionnements ponctuels des centrales électriques.

### Les barrières sociales, culturelles et comportementales

Cela permet de faire la liaison avec la sixième catégorie de barrières identifiée par Painuly : les barrières sociales, culturelles et comportementales [Painuly 2001]. En effet, l'acceptation des nouvelles technologies par la société/population est importante. L'acceptation sociale et publique des énergies renouvelables dans la production d'électricité pourrait représenter une barrière importante pour les transitions énergétiques, qu'il s'agisse de l'acceptation du produit ou de la technologie. À La Réunion, pour parvenir à cette acceptation, les autorités locales ont initié un processus à la fin des années 1990 [Bénard-Sora 2018b]. La Région Réunion, par l'intermédiaire du Président Paul Vergès, a lancé son plan d'autosuffisance énergétique insulaire à l'UNESCO en 1999. Dans le même temps, sur le territoire réunionnais, le conseil régional adopte le programme de planification énergétique appelé PRERURE (Plan Régional des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie). Ainsi, de manière claire, le territoire s'organise et prévoit une trajectoire pour une autonomie énergétique à l'horizon 2030 (qui représente également la fin de la transition démographique). À travers son plan PRERURE, le conseil régional a été un précurseur national dans trois domaines : la maîtrise de la demande d'énergie, la pénétration des énergies renouvelables et la mobilité durable [Bénard-Sora 2017].

Dans le cas des Comores, le territoire n'est pas encore totalement électrifié, et l'accès à l'eau potable n'est pas systématique. Le niveau de développement du pays est très faible avec un IDH de 0,503 pour l'année 2017. Pour ce type de situation de développement, la question de la transition écologique semble inappropriée au regard des problématiques profondes du territoire [Praene 2021]. Le niveau de pauvreté aux Comores est en effet élevé, avec un taux de 17,8% d'écart de pauvreté à 1,90\$ par jour en 2016 [Nations Unies 2017b]). Néanmoins, la promotion des énergies renouvelables pourrait permettre un développement accéléré du territoire et pourrait donc être considérée comme une opportunité [Praene 2021].

### Les autres barrières

La septième catégorie renferme les "autres barrières" qui sont d'ordre plus général : une politique gouvernementale "incertaine" générant trop d'incertitudes pour le développement de gros projets ; des dommages environnementaux qui peuvent être jugés inacceptables (leur

biodiversité souvent exceptionnelle [Jacquemot 2021] peut être un frein au déploiement de projets par manque de foncier); un manque d'infrastructures existantes générant un trop gros besoin d'investissement.

### 6.1.2 Évaluation des besoins du territoire : les déterminants de la consommation énergétique à l'échelle communale

Les petites îles non interconnectées présentent un contexte particulier en tant que territoire isolé aux ressources limitées. Le défi de l'autonomie énergétique y prend une dimension plus importante que pour un territoire continental, accentué par l'épuisement des ressources en combustibles fossiles. L'objectif principal de ces territoires est de devenir autonome énergétiquement [Sanseverino 2014]. Plusieurs études ont abordé ces questions sous l'angle du potentiel et des politiques en matière de sources d'énergie renouvelables (SER) [Weisser 2004a, Chen 2007, Praene 2012, Kaldellis 2012, Niles 2013, Elahee 2014]. Mais, il est évident que sans incitations politiques, le déploiement des énergies renouvelables sur les îles pourrait être compromis [Weisser 2004b, Sanseverino 2014]. La section 6.1.1, développée précédemment, a décrit l'ensemble des barrières auxquelles les îles sont effectivement confrontées pour la pénétration des énergies renouvelables dans leur réseau de production. Parmi les incitations politiques possibles, la mise en place de systèmes de réseaux intelligents, comme la *Demand Response*, pourraient soutenir le développement des énergies renouvelables, notamment en encourageant les clients à consommer de l'énergie en dehors des heures de pointe [Bénard-Sora 2016]. Par exemple, des simulations sur l'île de la Réunion ont montré que l'utilisation de solutions de *Demand Response* pouvait contribuer à réduire la capacité totale installée (énergie renouvelable) de 16,7% [Bouckaert 2014]. Mais pour mettre en œuvre les bons instruments politiques, il est important d'être capable de comprendre les besoins du territoire. C'est dans cette démarche que se sont inscrits les travaux publiés en 2016 [Bénard-Sora 2016].

Département français d'outre-mer et région ultrapériphérique de l'Union européenne (UE) située dans l'océan Indien, l'île de La Réunion connaît une croissance démographique importante. Sa population était estimée à 868 000 habitants au 1er janvier 2022 et devrait atteindre le million en 2037 [INSEE 2017]. La transition démographique de La Réunion est l'une des plus rapides observées dans le monde, comparable à celle de Singapour [Graham 1995] ou Hong-Kong [Yip 2001]. Selon sa variation démographique, la Réunion réalisera sa transition vers 2050 [INSEE 2017]. Cette transition démographique a une influence significative sur la consommation d'énergie et pousse la population à être considérée comme un facteur principal de la consommation d'électricité [Bénard-Sora 2016]. Cependant, d'autres facteurs, tels que l'activité économique, la pression foncière et les contraintes géographiques, pourraient être des paramètres importants pour comprendre la consommation d'énergie. Afin de préparer l'approvisionnement, il semble donc essentiel d'identifier les principaux déterminants de la consommation d'énergie. La demande énergé-

tique est en effet l'une des principales composantes de la politique énergétique [Yu 1997].

La situation démographique de l'île est si particulière que la piste de la population comme déterminant de la consommation peut être avancée. Associé à un relief contraint, La Réunion présente des enjeux particuliers en termes d'urbanisation. En effet, la population et les activités sont concentrées sur le littoral (Figure 6.1). En 1998, Jauze mettait en évidence la dominance d'une ceinture littorale nord-ouest (de Saint-Denis à Saint-Pierre) qu'il expliquait par la dépendance de l'île à la géographie physique et la localisation des principaux échanges avec l'extérieur [Jauze 1998].

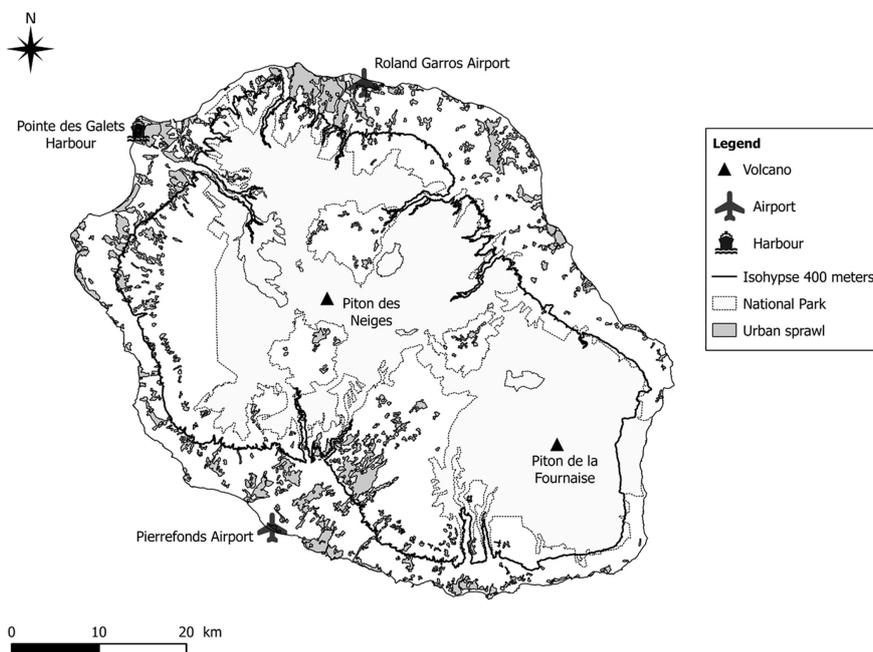


FIGURE 6.1 – Carte de l'Île de La Réunion : un relief contraint, une urbanisation limitée [Bénard-Sora 2016]

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés aux déterminants de la consommation d'électricité à la Réunion. En considérant l'échelle communale comme unité d'étude, nous avons ainsi testé deux hypothèses :

- H.[1] La population suffit à expliquer à elle seule la consommation d'électricité de l'île.
- H.[2] Il y a des facteurs multiples expliquant la consommation d'électricité de l'île.

Pour tester la première hypothèse, nous avons pratiqué une analyse bivariée à travers une démarche régressive. En considérant  $y$ , la consommation d'électricité par commune et  $x$ , la taille de la population communale, nous posons  $y = f(x)$  tel que  $y = ax + b$  avec  $a$  et  $b$  les coefficients de la droite de régression à calculer. on obtient alors les résultats suivants (Figure 6.2) :

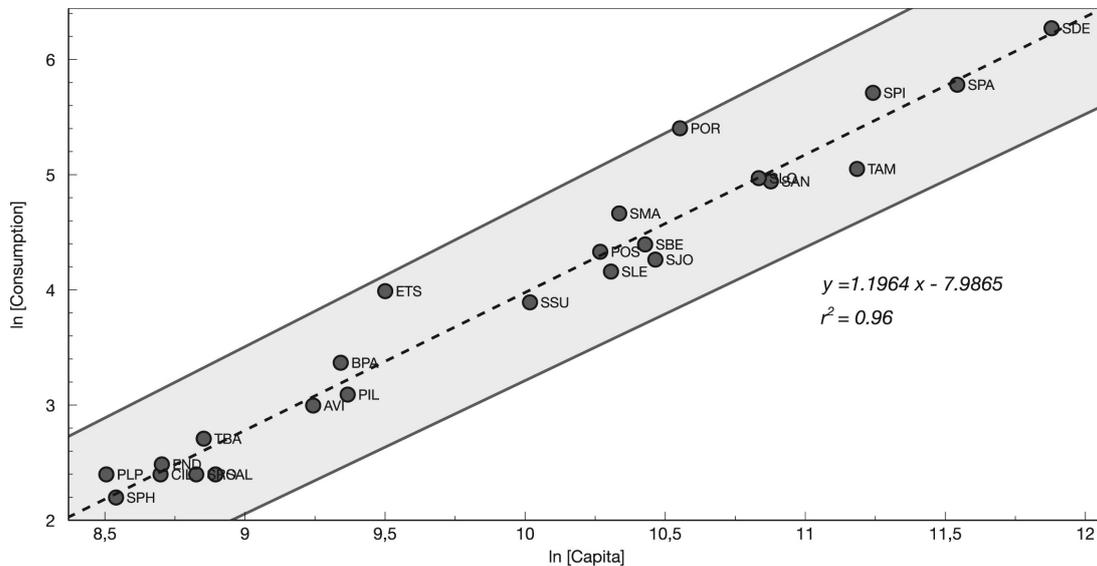


FIGURE 6.2 – Résultats de l'analyse bivariée : régression linéaire

Ces résultats, cumulés avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,96$ , nous permettent d'affirmer qu'il y a une forte influence positive entre la taille de la population et la consommation d'électricité des communes. Néanmoins, la figure 6.2 montre bien qu'un certain nombre de points sont largement sur ou sous-estimé par la droite de régression (qui ne reste qu'une moyenne). De plus, la consommation totale d'énergie est particulièrement sous-estimée avec un écart entre les données et les valeurs prédites d'environ 75,70 GWh. Cela représente environ la consommation énergétique de la commune de Sainte-Marie. Afin de comprendre cet écart, nous avons tenté d'analyser trois groupes de communes. Le premier groupe, que nous qualifions de "middle", est composé de 14 municipalités, qui suivent strictement la courbe théorique. Ces communes sont celles pour lesquelles la variable population est déterminante dans la consommation d'électricité. Ce groupe est très hétérogène. Nous y retrouvons en effet deux types de communes : des communes qui cumulent faible population et faible consommation, et des communes qui cumulent forte population et forte consommation. Le deuxième groupe, le groupe "low", est composé de sept communes pour lesquelles la courbe théorique surestime la consommation d'électricité. Cette surestimation peut avoir deux explications : soit leur population est extrêmement économe en énergie, mais il n'existe pas d'informations ou de données officielles permettant de l'établir, soit il s'agit de communes où l'activité industrielle (deuxième poste de consommation d'énergie électrique) est faible ou nulle. Ces communes sont Les Avirons, Petite Ile, Sainte-Rose, Saint-Leu, Salazie, Saint-Joseph, et Le Tampon. Il s'agit globalement de territoires à caractère rural. Enfin, le dernier groupe, le groupe "high", est composé de trois communes dont la consommation électrique est sous-estimée par la droite de régression. trois villes dans lesquelles la courbe théorique sous-estime la consommation. Il s'agit des communes du Port, de Sainte-Marie et de l'Étang-Salé, communes qui se distinguent par leur activité industrielle.

L'analyse montre donc bien que, bien que la taille de la population permet de fournir une

bonne approximation de la consommation d'électricité, selon les types de communes, leur taille, leur activité, il est important d'intégrer plus de facteurs explicatifs de la consommation d'électricité.

Ainsi, nous avons, dans un deuxième temps, introduit d'autres facteurs explicatifs à travers une analyse multidimensionnelle : une analyse en composantes principales. À partir de 5 variables d'analyse (La consommation d'électricité, la densité de population, la surface d'activité par habitant, le nombre de bâtiments industriels et le revenu net déclaré). Les résultats obtenus sont venus confirmer les résultats de l'analyse bivariée, permettant de distinguer les mêmes groupes de communes (middle, low et high). Ce constat nous amène à privilégier la régression linéaire pour représenter la consommation d'électricité des communes de La Réunion. En effet, les deux modèles ont permis de mettre en évidence non seulement l'importance du facteur population dans la détermination de la consommation d'énergie, mais aussi les disparités régionales existantes (trois profils de consommation mis en exergue) (Figure 6.3).

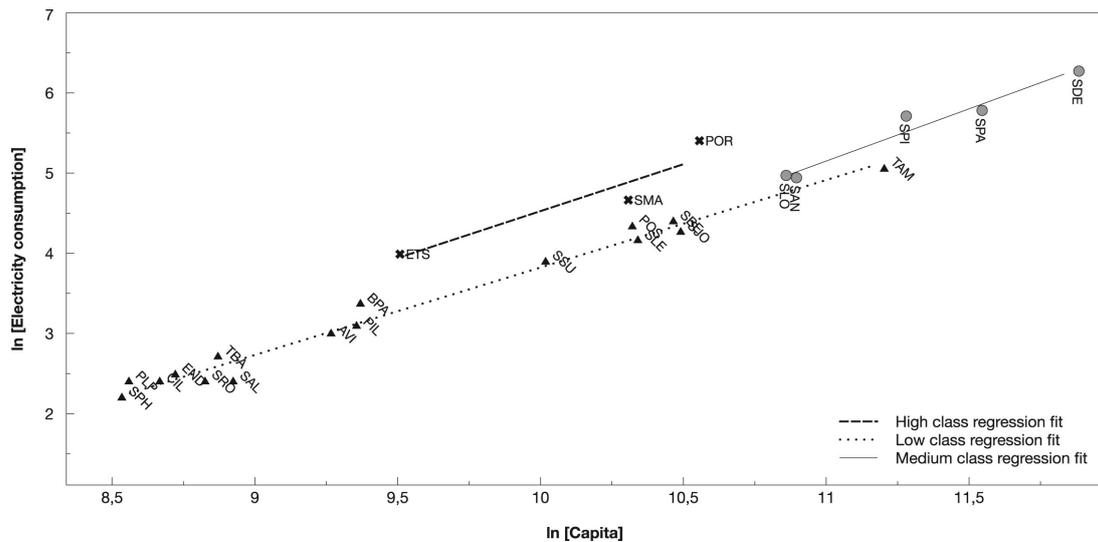


FIGURE 6.3 – Résultat final : trois profils de consommation d'électricité

### 6.1.3 Estimation de la demande énergétique : ratios de consommation à l'échelle du bâtiment

L'efficacité énergétique et la réduction des gaz à effet de serre des bâtiments neufs sont des objectifs clés des politiques internationales, nationales et locales qui visent à diminuer la consommation d'électricité dans les bâtiments. En France, les premières réglementations dans ce sens ont fait suite aux chocs pétroliers des années 1970 et à la volonté du gouvernement français de sécuriser sa situation énergétique. Pour sécuriser sa situation, il a cherché à réduire la demande d'une part et a lancé son programme nucléaire d'autre part. La première

réglementation thermique des bâtiments (RT1974) en France fixe un objectif de réduction de la consommation énergétique des bâtiments de 25% par rapport aux normes en vigueur depuis la fin des années 1950. Ce premier objectif a ensuite été actualisé par un dispositif législatif français assez riche : la loi sur la qualité de l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) [Journal Officiel de la République Française 1996], la loi de programmation énergétique (POPE) [Journal Officiel de la République Française 2005], la loi Grenelle II (ENE) [Journal Officiel de la République Française 2010], la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) [Journal Officiel de la République Française 2015], la loi Énergie Climat [Journal Officiel de la République Française 2019]. Cette réglementation thermique a été suivie de nombreuses mises à jour (la dernière version en vigueur est la RT2020 aussi appelée RE2020 pour réglementation environnementale). Ces objectifs d'économie d'énergie dans les bâtiments sont bien présents dans la politique énergétique française et afin d'aider à la mise en œuvre de cette politique, il est important de caractériser les consommations des bâtiments en distinguant notamment leur fonction : tertiaire, industrielle et résidentielle. Ce type de caractérisation est généralement réalisé par les agences de l'énergie telles que l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) ou l'ADEME en France. Les bâtiments sont les principaux consommateurs d'énergie dans nos sociétés modernes et agir sur eux est inévitable [Cheng 2016]. En France, le secteur résidentiel-tertiaire est le principal consommateur d'énergie finale (46%) [Sous-direction des Statistiques de l'énergie (SDES) 2021]. Cela montre l'importance de l'étude des bâtiments et l'intérêt de différencier les bâtiments, selon leur fonction. L'étude des caractéristiques des bâtiments pour l'analyse de leur consommation énergétique et de leurs émissions de carbone est courante dans la littérature [Ma 2017] et notamment dans l'étude du logement [Blom 2011].

#### **La production de ratios de consommation d'énergie par typologie de surface bâtie : Etude sur le cas de l'Île de La Réunion [Bénard-Sora 2018c]**

Le but de ce travail était d'apporter une lecture de la consommation d'électricité d'un bâtiment à travers la production de ratios de consommation d'électricité par mètre carré de bâtiment à partir d'une nouvelle approche SIG en segmentant les bâtiments, selon leur fonction : logement, industrie, administrations et commerces. Ces catégories correspondent aux catégories de consommateurs définies par le fournisseur d'électricité : EDF. Leur répartition inégale sur le territoire et leurs différents modes de consommation permettent de distinguer plusieurs ratios de consommation. Ces ratios sont basés sur leur répartition au sol, obtenue par calculs à partir de confrontations de différentes couches cartographiques vectorielles. L'approche SIG est une approche utile pour quantifier et qualifier un phénomène. L'intégration dans un même système d'analyse de modèles directement connectés à des données réelles facilite l'appropriation de la problématique par les différentes parties prenantes et permet par conséquent l'élaboration de politiques [Alhamwi 2017]. L'approche SIG permet de construire des stratégies de développement territorial, élaborer des scénarios d'évolution et ainsi améliorer le processus d'élaboration des politiques [Bénard-Sora 2018c]. Cela représente un potentiel analytique important pour l'étude de l'énergie à l'échelle d'un territoire, que ce soit pour l'application aux énergies renouvelables ou pour la modélisation de

la consommation énergétique [Li 2018]). Dans la littérature scientifique, il est aisé de distinguer plusieurs catégories de modèles basés sur les SIG qui mettent en avant leur potentiel pour l'analyse et l'élaboration de politiques urbaines et énergétiques. En effet, de nombreux travaux ont porté sur l'étude du potentiel des énergies renouvelables, qu'il s'agisse de la ressource solaire, de la ressource éolienne, du couplage de différentes ressources ou sur la consommation énergétique et le microclimat des bâtiments urbains [Bénard-Sora 2018c]. D'autres travaux ont porté sur l'étude spatiale de la consommation d'énergie et des émissions de carbone [Lu 2014, Jiang 2019]. Notre travail s'inscrit dans cette lignée afin d'apporter une lecture spatiale de la consommation d'électricité par  $m^2$  de surface bâtie. La méthodologie utilisée est présentée dans la figure 6.4.

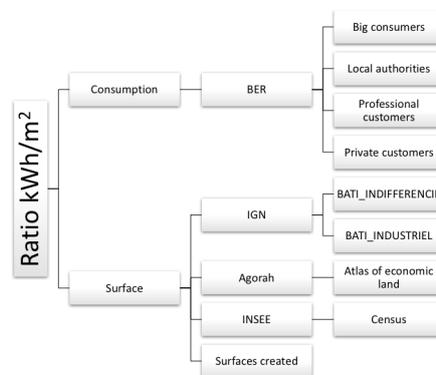


FIGURE 6.4 – Méthodologie - Calcul de ratio de consommation d'électricité par typologie de surface bâtie

La production du ratio provient de la confrontation de deux types de données : des données de consommation, d'une part, segmentées en types de consommateurs, et des données de localisation et de quantification, d'autre part, provenant de différentes sources. Le couplage des données a présenté un défi majeur : l'identification précise du bâti affecté à chaque type de consommateurs. Les résultats obtenus sont déclinés en deux représentations. La Figure 6.5 permet une lecture rapide des différents ratios calculés pour chaque type de consommateur et confrontés aux surfaces occupées, nombre de clients, etc. Les ratios obtenus correspondent aux attentes : le ratio des gros consommateurs est six fois plus élevé que celui des particuliers, le ratio des entreprises est double et le ratio des collectivités locales est le plus faible.

La figure 6.6 permet de visualiser la répartition spatiale des différents types de consommateurs. On y constate l'abondance des zones résidentielles par rapport aux autres types de consommateurs. Les zones correspondant aux gros consommateurs sont réparties de manière très inégale sur le territoire avec une concentration dans les villes du Port, Saint-Denis et Saint-Pierre. Il en va de même pour les zones occupées par les entreprises : les trois mêmes zones ont été identifiées au nord, au sud et à l'ouest de l'île. Sans surprise, on constate très clairement que les clients particuliers dominent le territoire. Notre premier travail de caractérisation des consommations électriques à l'échelle communale a montré que l'estimation des besoins en électricité pouvait effectivement se concentrer sur la population [Bénard-Sora 2016]. Ce second travail consiste, en plus de confirmer l'importance de la popu-

lation dans la consommation d'électricité du fait de son nombre, à localiser plus précisément sur l'île les besoins en électricité. Ainsi, les points des territoires les plus consommateurs et les moins consommateurs sont mis en évidence. La carte obtenue, en guise de résultat, pourrait être un excellent outil pour la planification énergétique.

Depuis la fin des années 1990, La Réunion s'est, en effet, fortement engagée dans une politique d'autonomie énergétique. Promotion des énergies renouvelables, généralisation des chauffe-eau solaires, couplage des énergies renouvelables avec les activités productives du territoire, notamment agricoles, rénovation énergétique des bâtiments, les actions en faveur de l'autonomie énergétique sont diversifiées. Ces efforts ont permis d'atteindre un niveau convenable de production d'électricité verte : en 2015, les énergies renouvelables ont représenté 36% de la production d'électricité à La Réunion, pour une valeur totale livrée 2891,3 GWh. Les projets de rénovation énergétique des logements et l'installation de chauffe-eau solaires sur l'ensemble de l'île pour réduire la consommation électrique sont deux axes d'une politique propre au niveau local : intégrer les habitants dans la transition énergétique. En effet, les autorités politiques soulèvent l'importance d'intégrer la population pour réussir cette transition. La compréhension de la consommation de la population est un élément essentiel pour mieux l'accompagner vers le changement tout en continuant à répondre à ses besoins. Un avantage réside également dans la possibilité de localiser cette consommation. Ces deux données (ratio de consommation, d'une part, et localisation, d'autre part) peuvent s'avérer très utile pour la construction des scénarios de planification énergétique visant à diminuer la demande en électricité, ou encore visant à estimer la demande énergétique supplémentaire dans des simulations d'augmentation du nombre de logements, ou d'augmentation de l'activité industrielle.

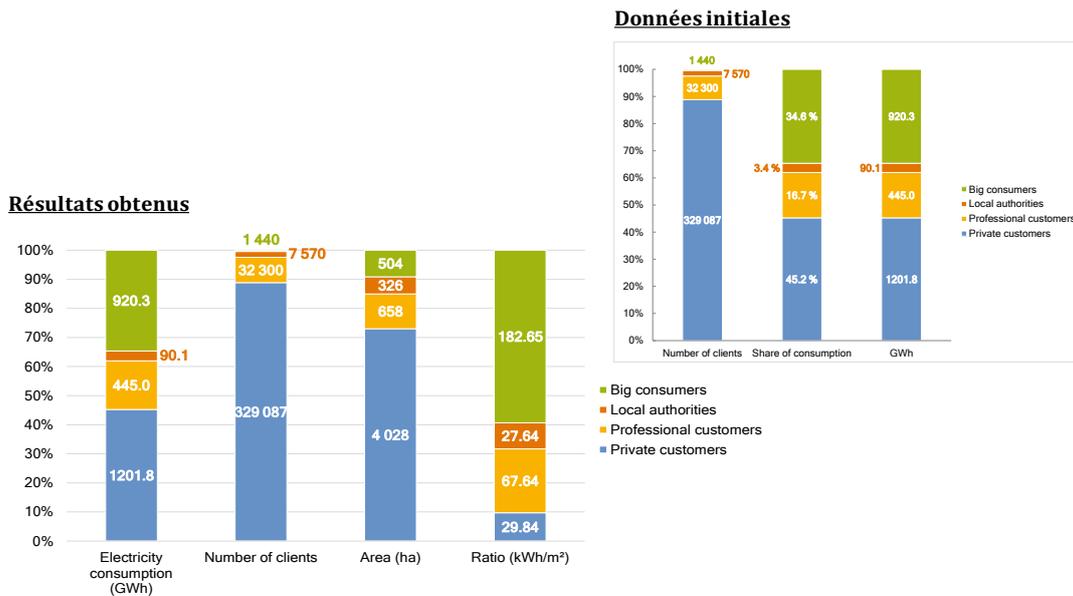


FIGURE 6.5 – Ratios de consommation d'électricité par typologie de surface bâtie

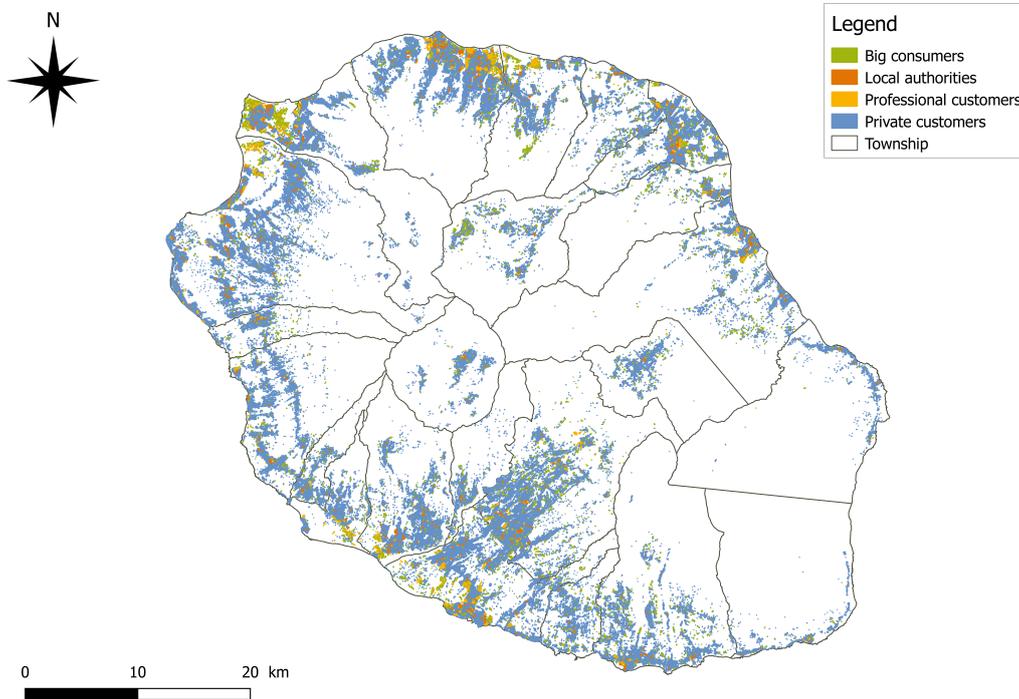


FIGURE 6.6 – Répartition spatiale des différents types de consommateurs

#### 6.1.4 Transport durable : diagnostic pour une mobilité vertueuse

Le secteur du transport occupe une place très importante dans les émissions de gaz à Effet de Serre (GES) et dans diverses pollutions locales (dont d'autres gaz et particules). Il a de fait un enjeu particulier dans la lutte contre le réchauffement climatique [Kaufmann 2022]. Ces enjeux de la décarbonation du secteur sont d'autant plus forts que le secteur des transports pèse à la fois sur les émissions de Gaz à Effet de Serre par les flux de déplacements générés, mais également sur la consommation des ressources fossiles puisque le pétrole constitue la principale ressource du secteur. Les pistes d'action pour la décarbonation sont vastes [Bigo 2020] et les solutions techniques déjà avancées, la piste électrique notamment, ne sont pas à la hauteur des enjeux. Pour une décarbonation efficace du secteur, il est impératif d'envisager une évolution des pratiques de mobilité, tant en volume qu'en qualité. Il s'agirait alors de tendre vers une mobilité plus vertueuse, une réduction des flux, mais aussi une transition vers des modes de transports plus doux.

La mobilité est un facteur d'intégration sociale [Lucas 2012, Boutueil 2013]. Elle désigne un franchissement de l'espace, un flux d'une origine vers une destination [Kaufmann 2021]. La mobilité est donc réelle et mesurable. C'est également un fait social, la mobilité conditionnant l'appropriation de l'espace (Bénard, 2022), elle est devenue une ressource de l'insertion

sociale [Cholez 2005]), un vecteur d'intégration [Boutueil 2013]). Or, il y a la mobilité que l'on fait et la mobilité que l'on ne fait pas, par choix ou par contrainte. Ce choix contraint caractérise une forme de précarité. On comprend qu'il y a une dimension sociale forte dans la notion de mobilité. C'est, ainsi, à travers la notion de motilité que la littérature a fait émerger cette notion sociale : la motilité reflète la capacité à se mouvoir [Dupuit 2015] et désigne alors les déplacements réels mesurés par la mobilité, mais également les déplacements potentiels. En intégrant ainsi une dimension sociale dans sa définition, la motilité permet une meilleure analyse de la précarité des ménages. Il existe des inégalités persistantes dans la capacité des ménages à se mouvoir, notamment à cause des coûts induits par la voiture particulière [Nicolas 2002]. Dans des territoires où la voiture particulière est la seule possibilité efficace pour se déplacer (par manque d'alternative), ne pas avoir accès à la voiture est un fait discriminant [Kaufmann 2000]. Certains ménages sont alors exclus d'une partie des aménités offertes par le territoire [Bénard 2022b]. L'accès à l'automobile permet de s'approprier le territoire et d'ouvrir à toutes les aménités proposées, en considérant des contraintes de temps et de coûts [Nicolas 2012]. La voiture individuelle fait globalement apparaître trois formes d'inégalités :

- La première concerne l'accessibilité à la voiture individuelle [Mignot 2004]. La population est alors séparée en deux groupes : ceux qui peuvent se déplacer librement et ceux qui ne peuvent pas.
- La seconde forme est liée à l'offre de transport : le manque ou l'absence d'alternatives modales solides sur le territoire fait peser sur le transport individuel toute la pression de la mobilité quotidienne. Cet état de fait constitue une pression pour les ménages et vient exacerber la première forme d'inégalité. En effet, l'absence d'alternatives de déplacement enlève aux ménages non motorisés la possibilité de se déplacer, les isole des aménités proposées par le territoire et réduit leurs possibilités d'intégration sociale [Delbosc 2012].
- La dernière forme d'inégalité est liée au budget : il s'agit de l'effort budgétaire à réaliser pour être motorisé et se déplacer en voiture. Selon l'importance de cet effort dans le budget global, la qualité de vie du ménage est impactée [Nicolas 2012]. Cette dernière forme est fortement impactée par la volatilité des cours de l'énergie. On parle ainsi de la vulnérabilité énergétique liée à la mobilité [Saujot 2012].

### **Étude sur le territoire réunionnais : existe-t-il des inégalités liées au transport et à la mobilité ?**

La situation sociale de l'Île de La Réunion est un fait préoccupant. Pendant des années, le département français a enregistré les taux record de chômage et de recours aux minima sociaux [Roinsard 2014]. C'est dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, après la départementalisation, que l'île de La Réunion a connu un certain nombre de changements structurants au sein de son économie et de sa société. Elle est passée, en quelques décennies, d'une société de plantation à une société de consommation de masse, mais sans être passé par une

étape d'industrialisation [Lajoie 2004]. Malgré un certain nombre de mesures politiques, économiques et sociales pour enclencher un rattrapage de la métropole française, son passé colonial reste marqué et retarde son évolution. Ainsi, l'économie se tertiarise rapidement en générant de nombreux emplois, notamment liés à la fonction publique, mais dans le même temps, l'agriculture décline. Les minimas sociaux et prestations sociales diverses ont également fait leur apparition, de même qu'un important chômage [Roinsard 2013]. De là, naît une première forme d'inégalité entre les travailleurs salariés et la partie de la société qui ne bénéficie pas d'un emploi. En effet, le niveau de qualification requis pour intégrer le secteur tertiaire est très exigeant, pénalisant les chômeurs réunionnais majoritairement peu ou pas qualifiés [Roinsard 2011]. Bien que le niveau d'étude augmente, l'accès aux postes à responsabilités comme les cadres, les professions intermédiaires, professions intellectuelles supérieures, artisans, commerçants et chefs d'entreprise reste réservé aux personnes ayant une expérience conséquente [Lajoie 2004]. Ainsi, une grande partie de la population devient dépendante des prestations sociales qui, pour certains ménages, constitue le revenu unique du foyer.

En outre, ces mutations de la société se sont accompagnées d'un urbanisme de masse par la construction de logements sociaux. Parallèlement, l'île de La Réunion assiste au développement de son réseau routier, et de son parc automobile, tandis que le chemin de fer est abandonné progressivement jusqu'à un abandon total en 1976 à l'ouverture de la nouvelle route du littoral [Jauze 2019]. Les évolutions et développements des infrastructures de transports ont alors participé à la banalisation de la voiture individuelle, dissimulant, par la même occasion, une nouvelle forme d'inégalités naissantes entre les individus et groupes sociaux [Gallez 2022]. Cette banalisation crée une situation particulièrement tendue aujourd'hui sur le réseau routier. La voiture représente le mode de transport principal, notamment pour les déplacements domicile-travail, même pour les courts trajets de moins de 2 km [INSEE 2021]. Le climat particulier et le relief escarpé sont des freins à l'utilisation d'autres modes [INSEE 2021], en plus du manque d'alternatives réelles.

C'est à travers une analyse factorielle couplée à un clustering (méthodologie présentée dans le chapitre 5) que nous avons choisi d'étudier la situation réunionnaise sur deux dates : 2007 et 2017. Sur ces deux dates, en utilisant la donnée statistique la plus fine possible (l'IRIS), nous avons procédé à une analyse factorielle sur un jeu de données comprenant une quarantaine de variables agrégées à partir de deux bases de données : les bases de données du recensement général de la population et la base Filosofi de l'INSEE. Nos variables se répartissent en 5 groupes : les infrastructures de transport afin de représenter la dotation et la diversité en infrastructures de transport sur chaque IRIS ; les revenus afin de traduire le niveau social ; le logement afin de traduire le niveau de vie de la population ; les caractéristiques générales afin de présenter les modes de déplacements principaux pour aller travailler et le type de travail occupé et enfin les catégories socio-professionnelles traduisant également le niveau de vie (Figure 6.7).

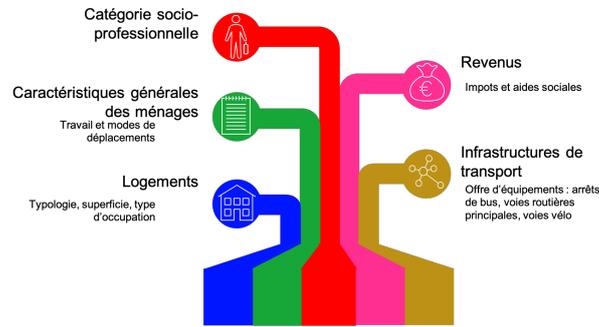


FIGURE 6.7 – Choix des variables

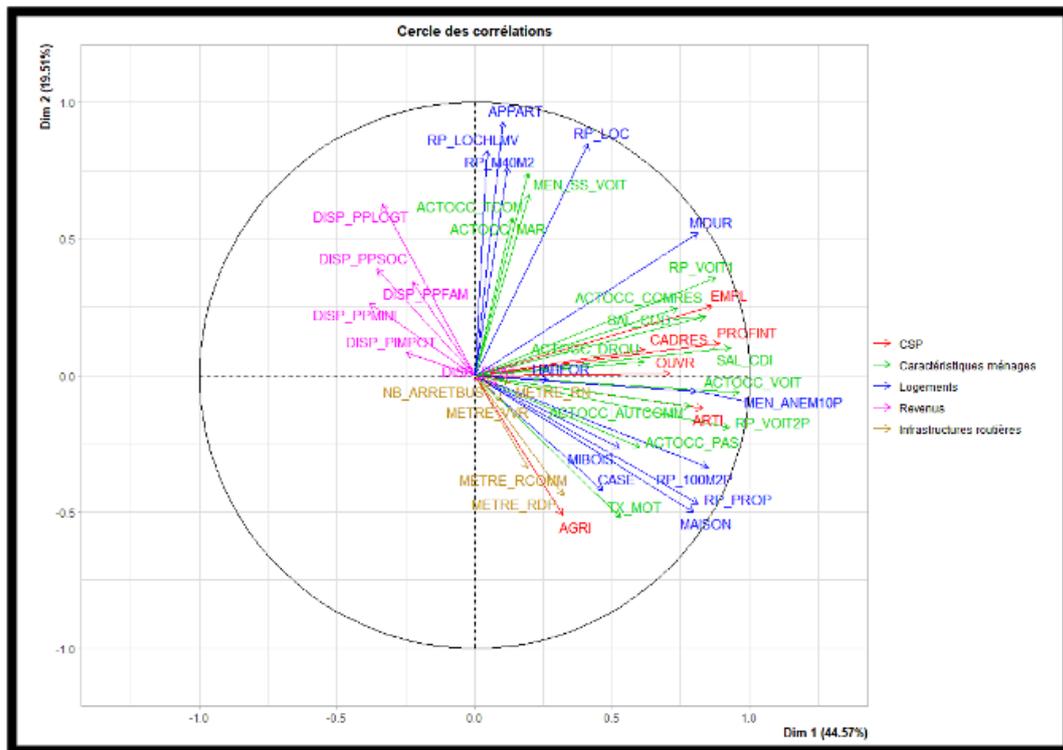


FIGURE 6.8 – Cercle de corrélation - Analyse factorielle

Le cercle de corrélation obtenu grâce à l'analyse factorielle et présenté dans la figure 6.8 nous fournit plusieurs informations intéressantes. Dans un premier temps, le cercle reflète la présence d'inégalités sur le territoire. Les ménages locataires, logés dans des appartements ou HLM de faible superficie, sont également ceux qui ne possèdent pas de voiture individuelle et se déplacent à pied ou en transport en commun. Lors de l'enquête déplacement grand territoire réalisée en 2015 par la SMTR sur l'île, les résultats montraient en effet que la clientèle des transports en commun n'était pas une clientèle de conviction, mais une clientèle captive n'ayant pas les moyens d'accéder à la voiture individuelle

[Syndicat Mixte Transport Réunion 2017]. Il s'agit de la première forme d'inégalités constatée. On peut qualifier ces ménages de ménages vulnérables. Il est intéressant néanmoins de noter qu'il n'y a pas de concentration spatiale et d'effets de répulsion avec les ménages propriétaires, motorisés, résidant dans des cases traditionnelles de grande superficie puisque ces deux groupes de variables sont orthogonaux sur le cercle. Néanmoins, on remarque une corrélation négative entre le groupe infrastructures routières et le groupe revenus-prestations sociales. Cela semble mettre en avant que les IRIS comprenant beaucoup de ménages qui bénéficient de prestations sociales, sont des IRIS peu dotés en infrastructures de transport. Cela indique alors des inégalités présentes sur le territoire puisque les ménages pauvres (bénéficiant de prestations sociales) ne bénéficient que de peu d'alternatives sur le réseau de transport. Cela renvoie à la deuxième forme d'inégalités.

En associant cette analyse à une Classification Ascendante Hiérarchique réalisée sur les résultats de l'analyse factorielle, nous obtenons une segmentation des IRIS de La Réunion en 4 classes (Figure 6.9). La représentation de ces clusters sur les axes factoriels 1 et 2 présentés précédemment permet d'apporter un éclairage sur ces quatre groupes. Ainsi, les deux premiers clusters peuvent être qualifiés de précaires. Le premier groupe, que nous qualifierons de *très précaires*, est en effet composé des IRIS avec les plus bas niveaux de revenus et percevant majoritairement des prestations sociales. Se concentrent donc dans ce groupe des IRIS aux ménages non motorisés, au chômage ou percevant des salaires faibles. Le second groupe représente les IRIS *précaires* : on y retrouve en majorité des logements sociaux, des ménages locataires, non motorisés, soumis aux prestations sociales. Les actifs occupés travaillent principalement dans leur commune de résidence. Le mode principal de déplacement est la marche à pied et les transports en communs.

Le troisième cluster, que nous qualifions de *très aisé*, met en évidence les CSP Cadres, Professions intermédiaires et Artisans, Chefs d'entreprises. Il s'agit des IRIS avec les revenus les plus élevés. Les ménages sont motorisés et possèdent plusieurs véhicules par foyer. Enfin, le quatrième groupe, que nous qualifierons de *moyens*, rassemble en majorité les CSP Employés et Ouvriers. L'accès à l'emploi, malgré des salaires bas, favorise un équipement automobile très dominant. Ainsi, la plupart des ménages ont au moins une voiture et travaillent dans une commune autre que leur commune de résidence. Il est également intéressant de remarquer que ce cluster est caractérisé par le nombre d'années passées dans la même commune en termes de résidence : plus de 10 ans pour ce cluster qui se démarque des autres sur ce point. Cette immobilité résidentielle alors même que les lieux de travail se trouvent dans d'autres communes pourraient traduire un manque de choix en termes de résidence pour ces ménages : le lieu de résidence n'est pas choisi, mais contraint. Si cela est vérifié, ce fait pourrait traduire une certaine vulnérabilité des ménages qui seraient alors soumis à de nombreuses perturbations de leur capacité de déplacement et donc de travail en cas d'augmentation des prix de carburant par exemple.

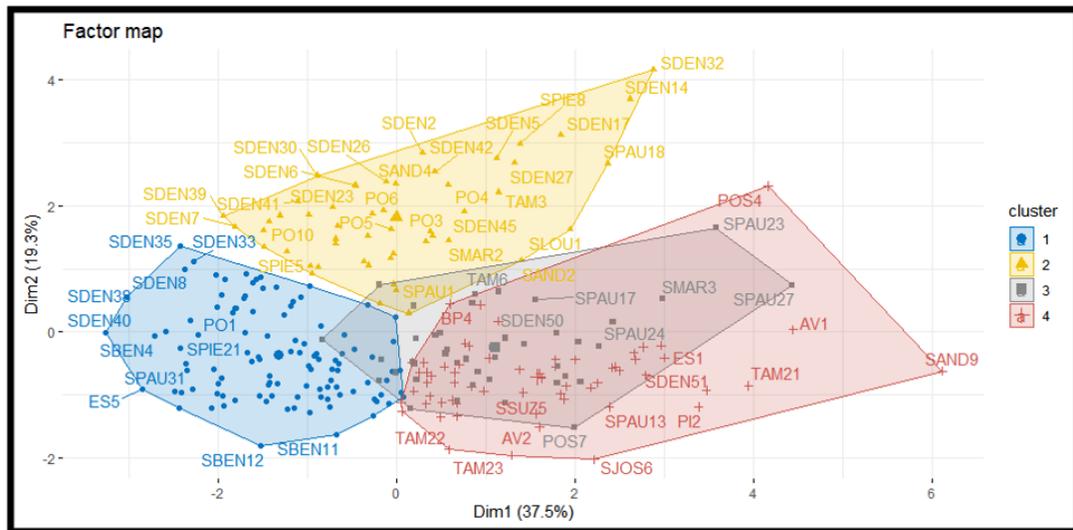


FIGURE 6.9 – Clustering - Analyse Ile de La Réunion

### Étude sur le territoire réunionnais : répondre au manque d’alternatives par l’introduction d’une nouvelle forme de mobilités

C’est dans le cadre de la possible implantation sur le territoire réunionnais d’une alternative vertueuse de déplacements que j’ai mené un travail en 2019 pour le compte d’une société privée dont l’ambition était de créer un réseau d’autopartage de véhicules propres alimentés par des bornes de recharge électrique : le dispositif lotola [Bénard 2019]. Les enjeux du travail reposaient sur plusieurs points : (1) Identifier les localisations optimales des stations de recharge ; (2) Évaluer l’efficacité de la localisation de ces stations. Ces enjeux ont généré des questions annexes : (3) Identifier le meilleur périmètre pour l’installation du service (échelle régionale ou échelle localisée) (4) Identifier l’intérêt ou non d’une distance minimale à avoir entre les stations et (5) Certains territoires de l’étude sont-ils plus avantageux que d’autres ?

Pour répondre à l’ensemble de ces enjeux, le travail s’est effectué en deux temps : l’identification du potentiel de clients par station de recharge dans un premier temps, et l’analyse de l’efficacité des localisations des stations par une analyse multidimensionnelle dans un second temps.

La liste des stations (leur localisation) a été fournie en amont de l’étude, choisies par opportunité foncière. Elles se répartissent sur 12 communes de la Réunion, avec 37% d’entre elles localisées dans le chef-lieu, Saint-Denis. En moyenne, les stations sont éloignées de 22,42 km avec un éloignement minimum de 283 m (zone dense de Saint-Denis).

Pour répondre au premier besoin, nous avons défini une zone d’influence géographique de 500 m (métré réel, mode piéton) autour de chaque station, ce qui a permis d’isoler sur le territoire 1,23 km<sup>2</sup> de surface bâtie de type résidentiel, touchant 69 quartiers IRIS de l’île. Sur ces quartiers, le RGP de l’INSEE permet de relever quelques informations notables quant aux

habitudes de déplacement (Figure 6.10).

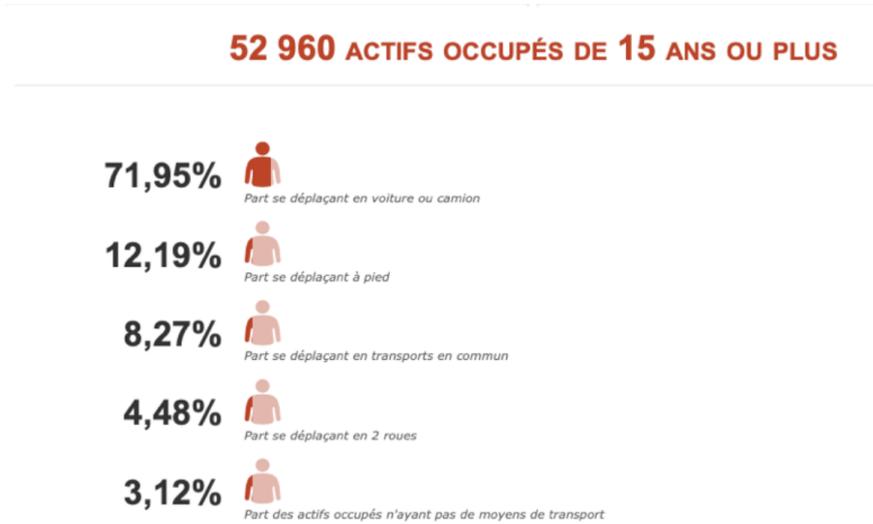


FIGURE 6.10 – Habitudes de déplacement sur le périmètre d’étude. Source : données du RGP INSEE, 2015

Le calcul du potentiel de clients a été réalisé en considérant que 100% des clients-cibles potentiels vont utiliser le dispositif lotola. Effectivement, les déterminants des choix d’utilisation du consommateur potentiel ne faisaient pas l’objet de l’étude. La cible du client était double : les usagers des transports en commun et les étudiants pour un objectif minimal de 320 clients et maximal de 3000 clients. Le calcul a consisté à isoler le marché potentiel atteignable dans un marché total disponible (basé sur la surface résidentielle occupée par les clients cibles :

$$C_p = \frac{s_i}{s_n} c_n \tag{6.1}$$

avec  $c_p$  le nombre de clients potentiels,  $c_n$  la cible totale,  $s_i$  la surface résidentielle comprise dans le périmètre d’influence défini et  $s_n$  la surface résidentielle totale des IRIS touchés. Cela nous a permis de faire émerger les résultats suivants (Tableau 6.1, Figure 6.11) qui montrent que la cible visée par le client est en adéquation avec ses ambitions de volume.

TABLE 6.1 – Résultats LOTOLA - Clients potentiels

Type de client	Minimum envisagé	Maximum envisagé	Potentiel calculé	Variation par rapport au maximum
Clientèle captive des Transports collectifs	120	1000	1039	+3,9%
Clientèle étudiante	100	2000	4285	+114,3%
Total	220	3000	5324	+77,5%

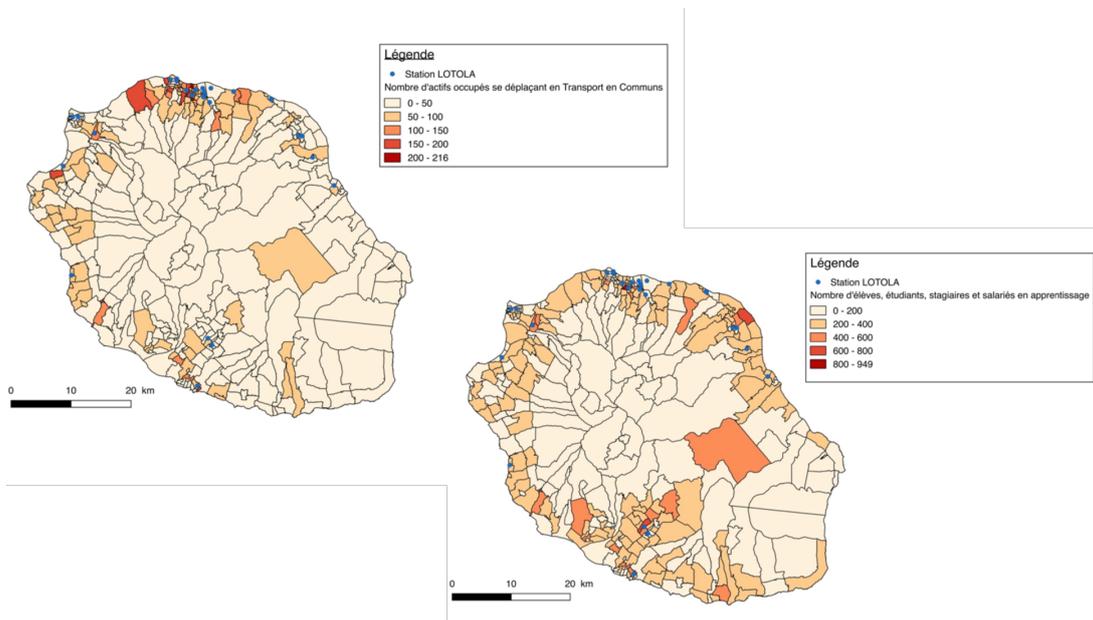


FIGURE 6.11 – Représentation des stations potentielles Lotola confrontées aux cibles potentielles

Dans le cadre de ce diagnostic, dans la deuxième partie du travail, nous avons mené une analyse multivariée sur les données caractérisant les différentes implantations des stations afin d’estimer la performance de ces stations. L’ensemble de ces stations semblent-elles importantes ou certaines présentent-elles des avantages plus prononcés ? L’objectif est d’identifier : (i) Les stations les moins performantes et les plus performantes, (ii) Les caractéristiques des stations, afin d’identifier un profil. Afin de répondre à ces deux objectifs, une Analyse en Composantes Principales (ACP) couplée à une classification ascendante hiérarchique (CAH) sont proposées grâce aux variables d’analyse suivantes (Tableau 6.2) :

TABLE 6.2 – Identification des variables - Analyse multivariée - Projet LOTOLA

Code	Dénomination variable	Méthode d’acquisition
bat_res	Surface bâtie de type résidentiel dans le polygone d’isodistance	Calculs et création (SIG, RGP INSEE)
TC	Nombre de clients usagers des transports en communs envisagés	Calculs (SIG, RGP <sup>2</sup> INSEE)
Etud	Nombre de clients étudiants envisagés	Calculs (SIG, RGP INSEE)
Dist_min	Distance de la plus proche station	Création (SIG)
Dist_max	Distance moyenne aux autres stations	Calculs (SIG)
Pop	Population globale dans les IRIS touchés	RGP INSEE

Les résultats sont présentés dans la figure 6.12 : le graphique des individus peut être lu grâce à la grille de lecture affichée en haut à droite. Les principales conclusions suivantes ont pu être tirées de l’étude :

- Le choix de la localisation des stations dans toute l’île plutôt que sur un territoire plus restreint (aire urbaine de Saint-Denis par exemple) apparaît opportun.

- La distance minimale entre les stations n'est pas un critère déterminant de l'efficacité des stations.
- Un profil type a pu être dégagé par le clustering : les stations les plus performantes sont des stations localisées dans des zones où le bâti résidentiel est important et la population forte, avec une part d'étudiants et d'utilisateurs des transports en communs au-dessus de la moyenne.

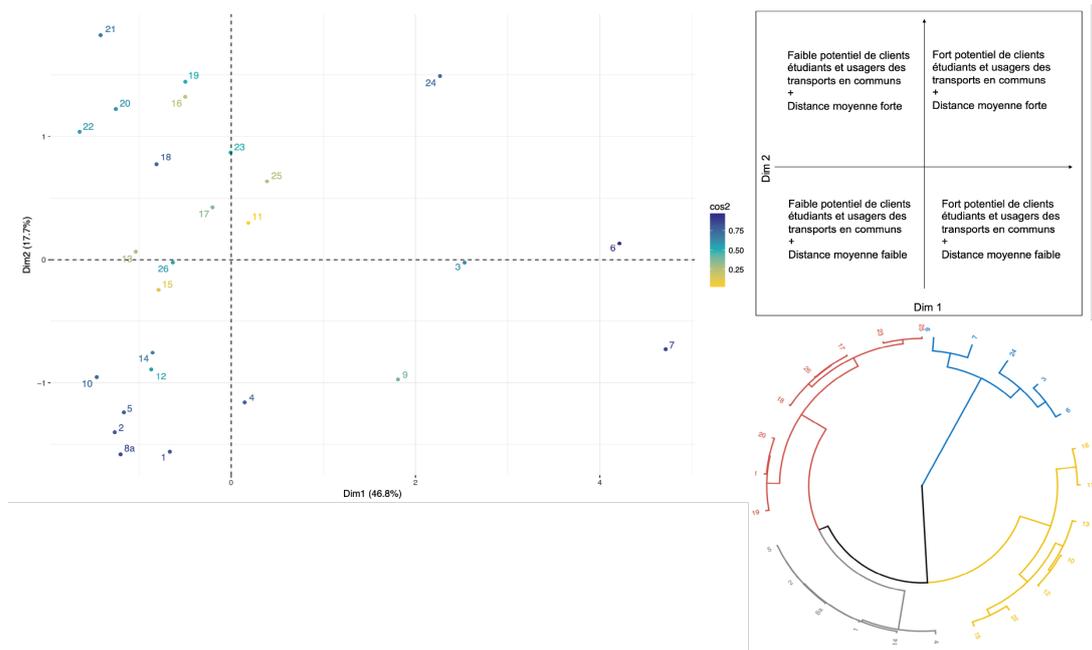


FIGURE 6.12 – Lotola - résultats de l'analyse multivariée

### 6.1.5 Synthèse

Les travaux de diagnostic réalisés sur plusieurs champs de la transition énergétique permettent d'avoir une lecture du territoire faisant apparaître les forces et faiblesses. Le travail réalisé à l'échelle régionale sur l'île de La Réunion et l'archipel des Comores permet d'identifier les défis à relever pour la modification du mix électrique par une pénétration maximale des énergies renouvelables. À des échelles plus fines, communales et au niveau du bâti, les travaux d'analyse de la consommation d'énergie ont permis de faire émerger les déterminants de la consommation et de produire des données pouvant être utiles aux démarches de prévision et de prospection de la demande énergétique. Enfin, les travaux réalisés sur le transport et la mobilité permettent de mettre en exergue deux formes d'inégalités présentes sur le territoire face à la transition énergétique : des ménages en situation de précarité ne disposant pas de voiture individuelle et un manque d'alternatives au niveau de l'offre de transport. En somme, il s'agit d'une incapacité à se déplacer. Les défis des politiques publiques en matière de transition énergétique vont alors être nombreux.

## 6.2 Évaluation des politiques publiques en matière de transition énergétique : analyse du cas de l'île La Réunion

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des politiques publiques. Elles se subdivisent globalement en deux groupes : les évaluations *ex ante*, qui évaluent les effets potentiels d'une politique avant son introduction ; et les évaluations *ex post*, qui mesurent ses impacts réels après sa mise en œuvre [Bono 2012]. L'évaluation des politiques publiques est complexe, mais elle anime de plus en plus le débat public [Givord 2014]. Comment déterminer l'efficacité d'une politique ? Quelles sont les variables utiles pour l'évaluation ? Quels sont les instruments de mesure de l'efficacité ? L'aspect très qualitatif de l'analyse est risqué, car il faut s'assurer que toute subjectivité est évacuée de l'analyse.

Nous avons dans ce cadre réalisé plusieurs études d'évaluation des politiques publiques en matière de transition énergétique à La Réunion. Les champs couverts sont larges : la planification énergétique, les projets d'aménagement durable, la mobilité décarbonée et la gestion durable des déchets plastiques. À l'exception de la dernière étude sur la gestion des déchets plastiques, l'ensemble des études concernent des évaluations *ex post*.

### 6.2.1 La planification énergétique

L'énergie, en France, est encadrée par un paquet législatif assez conséquent, depuis la LAURE en 1996, jusqu'à la récente loi Energie-Climat de 2019. En un peu plus de 20 ans la France a publié pas moins de 6 lois sur l'énergie :

- 1996 : Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'Énergie (LAURE) [Journal Officiel de la République Française 1996]
- 2005 : Loi POPE, Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique [Journal Officiel de la République Française 2005]
- 2009 : Loi Grenelle I [Journal Officiel de la République Française 2009]
- 2010 : Loi Grenelle II [Journal Officiel de la République Française 2010]
- 2015 : Loi LTECV [Journal Officiel de la République Française 2015]
- 2019 : Loi Énergie-Climat [Journal Officiel de la République Française 2019]

En, 2018, nous avons passé sous le prisme de notre analyse 4 d'entre elles : la loi POPE, les lois Grenelle et la loi LTECV [Bénard-Sora 2018b]. Notre attention s'est portée sur quatre critères d'analyse : la lutte contre le réchauffement climatique (GW) ; la promotion des énergies renouvelables pour modifier le mix énergétique (RES) ; la gestion de la demande (DSM) ; la proposition d'outils de planification pour l'ancrage au territoire (P) (Tableau 6.3). L'analyse des trois premiers critères (GW, RES, DSM) permet de montrer que les objectifs sont maintenus dans le temps : peu d'évolution en termes de seuils, mais une réaffirmation ferme à chaque nouveau texte. Concernant le dernier critère (P), le Code de l'urbanisme est constamment complété à chaque nouveau texte, ce qui montre le lien étroit entre urbanisme et planification énergétique. Ce lien est confirmé par les différents plans de planification territoriale

créés par ces lois, comme le Plan Climat Energie Territoire (PCET) ou le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE).

TABLE 6.3 – Analyse de 5 lois françaises sur l'Energie [2005-2015]

	GW	RES
POPE 2005	*To reduce average annual greenhouse gas emissions by 3% per year. *Goal of dividing by four global emissions of greenhouse gases by 2050.	*To meet 10% of France's energy needs from renewable energy sources (including 21% of electricity needs) by 2010.
Grenelle 1 and 2 2009 2010	*Same goals with precision : In 2050, reduce annual greenhouse gas emissions to less than 140 million tonnes of carbon dioxide equivalent.	*To increase the share of renewable energy to at least 23% of final energy consumption by 2020.
LTEPCV 2015	*Reduce greenhouse gas emissions by 40% between 1990 and 2030 and divide by four greenhouse gas emissions between 1990 and 2050.	*To increase the share of renewable energies to 23% of gross final energy consumption in 2020 and 32% of this consumption in 2030. *In 2030, renewable energies must account for 40% of electricity production, 38% of final heat consumption, 15% of final fuel consumption and 10% of gas consumption.
	DSM	P
POPE 2005	*To bring the annual rate of decline of final energy intensity to 2% in 2015 and 2.5% in 2030.	*Urban Planning Code is completed and rules of the PLU are modified (for example, the possibility of extending the land load factor if a building is of high energy performance). *Proposal of Climate Plan.
Grenelle 1 and 2 2009 2010	*Mentioned but no numerical targets	*Urban Planning Code is completed and rules of the PLU are modified. *The link between the different planning documents of the territory is clarified and their sustainable development goals reaffirmed. *Territories (regions, departments, municipalities and groups of municipalities) of more than 50,000 inhabitants are encouraged to establish Territorial Climate Energy Plan (PCET). *Creation of a regional renewable energy plan for each region.
LTEPCV 2015	*To reduce the final energy consumption by 50% in 2050 compared to the reference 2012, aiming at an intermediate objective of 20% in 2030.	*Urban Planning Code is completed and details are given on the different planning documents such as the PLU. *Creation of "positive energy territories".

La loi POPE a établi les priorités de la politique énergétique française [Journal Officiel de la République Française 2005] et a fait du changement climatique une priorité de la politique énergétique. La question énergétique est traitée en 4 points : stratégie énergétique nationale, gestion de la demande, énergies renouvelables et orientation de la politique énergétique française. La gestion de la demande se décline à plusieurs niveaux : certificats d'économie d'énergie, gestion de l'énergie dans les bâtiments et information des consommateurs pour permettre la transparence et la responsabilisation de l'utilisateur. L'orien-

tation stratégique prise par la France peut être résumée en deux axes : d'une part, elle assure la cohérence entre les différents niveaux politiques (local-national-européen), et d'autre part, elle assure la diversification de l'approvisionnement énergétique (maintien du nucléaire et promotion des énergies renouvelables)[[Journal Officiel de la République Française 2010](#)]. Cette loi a donné naissance aux PCET, qui sont des projets territoriaux de développement durable dont l'objectif est de lutter contre le changement climatique et de favoriser la planification de l'adaptation. Le résultat visé est un pays résilient et robuste qui profite à sa population et à ses activités.

Ces démarches volontaires sont à l'initiative des autorités locales. Le PCET est un cadre de stratégies à différents niveaux du territoire pour maîtriser la consommation d'énergie, augmenter la production verte et réduire les émissions. Cette première version du PCET reste une démarche non contraignante pour les collectivités. Suite à la loi POPE, la France développe un " Plan Climat " national mis à jour tous les deux ans avec des mesures nationales de lutte contre le changement climatique. Les secteurs prioritaires sont le bâtiment et les transports. Il combine des mesures réglementaires, fiscales et incitatives pour limiter la consommation d'énergie de ces deux secteurs et promouvoir les énergies renouvelables.

En 2009 et 2010, la France a adopté les lois Grenelle. La première énumère un certain nombre de mesures concernant notamment la lutte contre le changement climatique, la protection de la biodiversité et des milieux naturels et la prévention des risques pour l'environnement et la santé [[Journal Officiel de la République Française 2009](#)]. Outre les mesures classiques de lutte contre le réchauffement climatique, cette loi lie clairement aménagement et énergie en favorisant les énergies renouvelables dans le Code de l'urbanisme [[Journal Officiel de la République Française 2010](#)]. Le Grenelle 2 impose l'élaboration de PCET pour les collectivités locales de plus de 50 000 habitants. Il prend le relais du SRCAE. Ce document reprend les orientations des directives européennes sur le climat et l'énergie au niveau régional. Ce schéma fixe les grandes orientations pour réduire les consommations d'énergie et prévenir les émissions de gaz à effet de serre. Il s'appuie principalement sur un inventaire des émissions de gaz à effet de serre et de polluants chimiques et sur un bilan de la production énergétique au niveau régional. Ce schéma doit ensuite déterminer des objectifs à l'horizon 2020 et 2050 pour enrayer le changement climatique, atténuer son impact, s'adapter pour réduire la pollution atmosphérique et fixer des objectifs pour renforcer l'utilisation des énergies renouvelables.

En vue de la Conférence sur le changement climatique (COP21) qui s'est tenue à Paris fin 2015, la France a voté la LTECV en août 2015. En environ deux cents articles, la loi vise à renforcer la lutte contre le changement climatique et à renforcer l'indépendance énergétique en équilibrant mieux les différentes sources d'approvisionnement. Les mesures envisagées sont variées avec, par exemple, la rénovation des bâtiments (rénover énergétiquement 500 000 logements par an à partir de 2017, dont au moins la moitié provient de ménages à faibles revenus). Un autre objectif est de réduire la précarité énergétique de 15% d'ici 2020 [[Journal Officiel de la République Française 2015](#)]. cette loi a créé un label pour les

territoires en transition énergétique : " Territoire à Energie Positive pour la Croissance Verte " (TEPCV). L'objectif est de donner une impulsion à un territoire pour favoriser un engagement dans l'excellence environnementale. Un appel à projets a été lancé en France en 2015, et sur 500 candidatures, 212 territoires lauréats ont obtenu le label TEPCV. Ces territoires s'engagent dans un programme d'actions pour atteindre les objectifs suivants : réduction des consommations énergétiques des bâtiments, réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports, gestion plus durable des déchets, développement des énergies renouvelables, préservation de la biodiversité, éducation à l'environnement et participation citoyenne. À la Réunion, trois territoires ont été labellisés : CIVIS (Communauté Intercommunale des Villes Solidaires), CIREST (Communauté InteRcommunale de l'EST) et TCO (Territoires de la Côte Ouest).

Afin de compléter notre analyse du paquet législatif français en matière d'énergie, nous avons souhaité dresser un parallèle avec les documents d'urbanisme. Ainsi, nous avons dressé une photographie de l'Île de La Réunion en 2018 et avons mis en exergue les documents de planification qui devraient exister en matière d'énergie et d'urbanisme, et ceux réellement effectifs (Figure 6.13). La multitude d'échelles et les inévitables retards de mise à jour freinent la mise en œuvre des projets de territoire. Les textes législatifs et normatifs relatifs à la question de l'énergie sont nombreux à la Réunion, en tant que territoire français. Néanmoins, cette législation a produit une multitude de documents, chacun correspondant à une échelle précise. À la Réunion, tous ces documents ne sont pas encore mis en œuvre. Si certaines parties du territoire suivent les évolutions, comme les CIREST, TCO et CIVIS qui ont suivi l'apparition du TEPCV, d'autres parties du territoire sont à la traîne. C'est aux échelles les plus fines que les documents sont en retard : à l'échelle des groupements de communes et des communes. On distingue également les documents d'urbanisme purs des documents de planification énergétique : les documents d'urbanisme sont plus largement déployés que les documents de planification énergétique. Mais puisque la question énergétique est traitée dans les documents d'urbanisme, ce n'est pas la question énergétique qu'il faut interroger. C'est plutôt le manque de moyens pour la mise en œuvre, ou peut-être même le manque de lisibilité, pour les collectivités en charge de la mise en œuvre. Il est envisageable que cette multitude de documents entrave la mise en œuvre. Un projet urbain mis en œuvre dans une région spécifique devra respecter un certain nombre de documents, mais ces documents ne seront pas toujours à jour et pourront parfois être obsolètes.

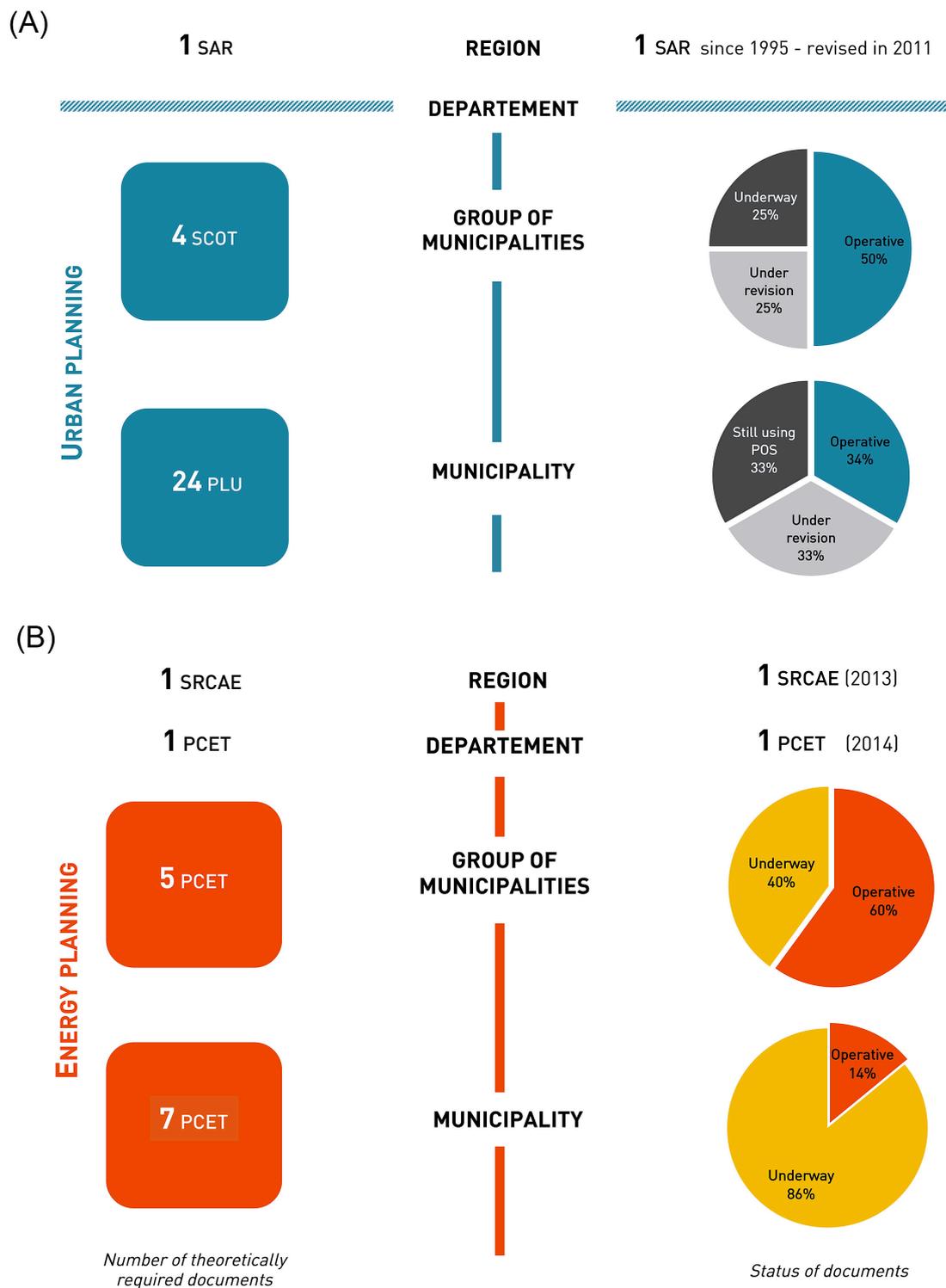


FIGURE 6.13 – Documents prescrits par la loi et documents en vigueur en 2018. Une analyse des documents de planification énergétique et d’urbanisme

### 6.2.2 La mesure des effets des politiques de transition énergétique sur les ménages

Les enjeux des politiques de transition énergétique sont globaux, mais leur application a des conséquences au niveau local. La transition énergétique, dans ses aspects technologiques, est censée initier des changements importants dans le quotidien des ménages, qu'il s'agisse de leur rapport à l'énergie du domicile ou dans leur rapport à la mobilité [Jouffe 2013]. De la question de la transition énergétique émergent les questions de précarités sociales et d'inégalités. La réduction des inégalités constitue l'objectif 10 des Objectifs de Développement Durables définis par les Nations Unies. Dans la littérature, la mesure des inégalités, que l'on assimile à des inégalités économiques, est souvent représentée à travers des courbes de distribution de revenus au sein d'une population. C'est notamment le revenu des ménages qui est considéré. Or, le revenu des ménages est consacré à trois principaux postes de dépense : logement, transport et biens composites. La transition énergétique va impacter de manière directe les deux premiers postes et de manière indirecte le troisième poste de dépense. Il est donc possible d'analyser les effets des politiques de transition énergétique sur les ménages en analysant l'impact sur leurs revenus et la répartition entre les trois postes de dépense. Afin d'analyser cet impact, nous avons choisi de nous appuyer sur les modèles d'économie géographique standard.

En considérant un modèle monocentrique standard, on considère qu'un revenu  $Y$  d'un ménage rationnel va se décomposer en trois postes de dépenses :  $s$ , un bien logement,  $z$ , un bien composite et  $T$ , la dépense de transport qui dépend de la distance  $r$  au centre. Le ménage maximise alors une fonction d'utilité  $U(z, s)$  sous contrainte de budget. On obtient alors :

$$\max_{z,s,r} U(z, s) \text{ s.c. } R(r)s + z + T(r) = Y \quad (6.2)$$

où  $R(r)$  représente la rente foncière et  $T(r)$  le coût de transport lié à la mobilité quotidienne domicile-travail [Fujita 1989]. On comprend à travers cette équation l'importance du budget transport dans la maximisation de l'utilité. En effet, le budget des ménages permettant d'effectuer le choix de  $z$  et  $s$  se fait après déduction du coût de transport. On obtient alors :

$$\max_{z,s,r} U(z, s) \text{ s.c. } R(r)s + z = Y - T(r) \quad (6.3)$$

Le transport prend une place particulièrement déterminante dans le budget. De plus, en considérant que la dépense  $s$  est une dépense incompressible (une fois le logement choisi, la dépense est fixe a priori), la dépense  $T(r)$  devient la seule dépense effectivement arbitrageable. Elle conditionne ainsi l'existence de la dépense  $z$ . La capacité à assurer les dépenses de transport conditionne donc l'accès aux autres biens de l'économie, à l'exception des dépenses alimentaires : il s'agit des dépenses d'habillement, culture, service, etc. On comprend alors que du choix de localisation et des coûts de transports induits vont dépendre la capacité à consommer des biens  $z$ . Dans le modèle de Fujita, un ménage cherche donc à optimiser  $r$  de manière à maximiser sa satisfaction en  $z$  et  $s$ . Or, la capacité à consommer des biens  $z$  est un gage d'insertion des membres du ménage dans la société. Le budget disponible pour l'accès à l'habillement, l'accès à la culture, ..., est un élément important pour la qualité de vie du

ménage. L'intégration sociale passe, en effet, par la capacité à se mouvoir vers les activités économiques [Boutueil 2013].

Dans le contexte de la transition énergétique, les inégalités sont exacerbées. Pour les définir, il faut faire appel au concept de précarité énergétique. Celui-ci se définit comme une inadéquation entre les ressources des ménages et leur situation contrainte. En effet, la loi française Grenelle 2 définit la précarité énergétique de la manière suivante : *"Est en situation de précarité énergétique une personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat."* [Journal Officiel de la République Française 2010]. Pour un ménage, la transition énergétique risque d'impacter sur l'accessibilité à l'énergie, par manque de ressources. Or, l'accessibilité à l'énergie est une condition essentielle au développement humain [BAFOIL 2014]. Les Nations Unies en ont d'ailleurs fait leur Objectif de Développement durable n°7 : "L'accès universel à une énergie durable". Une énergie durable fait référence à une énergie non carbonée, à une énergie renouvelable. Or, la société actuelle a construit tout son mode de fonctionnement sur les énergies fossiles. Ainsi, tendre vers une énergie durable, c'est changer de paradigme dans la production d'énergie et risquer de provoquer une augmentation des prix de l'énergie. Cela risque alors de fragiliser les ménages déjà vulnérables. L'accessibilité de l'énergie est donc un défi majeur de la transition énergétique. Politiques environnementales et problématiques sociales apparaissent ainsi comme deux dimensions indissociables de la politique publique [Chancel 2013]. La précarité énergétique comprend deux dimensions : la dimension bâtiment, la mieux connue, et la dimension mobilité [Saujot 2012].

#### **Analyse de l'impact d'une mobilité individuelle tout-électrique sur la vulnérabilité des ménages : Le cas de La Réunion [Bénard 2022b]**

Notre analyse des inégalités va se concentrer sur l'accès à la mobilité à travers l'accès à la voiture en questionnant les effets d'une transition au tout-électrique sur le budget des ménages réunionnais. Pour rappel, il existe trois formes d'inégalités liées à la voiture individuelle (section 6.1.4) : l'accessibilité à la voiture individuelle, l'offre de transport et l'existence d'alternative à la voiture, la vulnérabilité énergétique liée à la mobilité.

En 2021, la commission européenne a réuni son conseil Environnement pour travailler sur le paquet "Ajustement à l'objectif 55". De ce travail est ressorti une volonté forte de réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de tous les secteurs économiques, dont le secteur transport. Pour ce secteur, un objectif de réduction de 100% des émissions du parc automobile neuf à compter de 2035 a été fixé. De cet objectif découle donc la fin de la vente des véhicules thermiques neufs à compter de 2035. Le texte prévoit des mesures facilitatrices de la progression des véhicules électriques dans le parc roulant : déploiement des énergies renouvelables et des stations de recharges pour les véhicules électriques. Néanmoins, la question du coût de la transition pour les ménages n'est pas abordée. Pourtant, ce choix du tout-électrique va faire peser, à terme, le poids de la transition énergétique sur

le budget des ménages. En travaillant sur le contexte particulier de La Réunion, nous avons tenté de mesurer ce poids.

Cette étude a permis de faire ressortir trois principaux obstacles à la mutation au tout-électrique de l'offre de véhicules individuels neufs.

#### La question de la faisabilité technique

Le premier obstacle concerne l'appareil productif présent sur l'île : avec 19 infrastructures de production installées dans l'île pour une puissance de 899,7 MW et une production de 3046,9 GWh, la capacité d'extension des installations semble limitée, notamment à cause du relief contraint. L'île de La Réunion est une zone non interconnectée, avec une production électrique carbonée. Du fait de son insularité et de sa forte population, les importations fossiles sont aujourd'hui incontournables pour satisfaire aux besoins énergétiques de l'île. Le mix électrique se compose donc de 68,8% d'énergies fossiles, de 17,5% d'énergies renouvelables et de 13,7% d'hydraulique [Observatoire Energie Reunion 2020] (Figure 6.14).

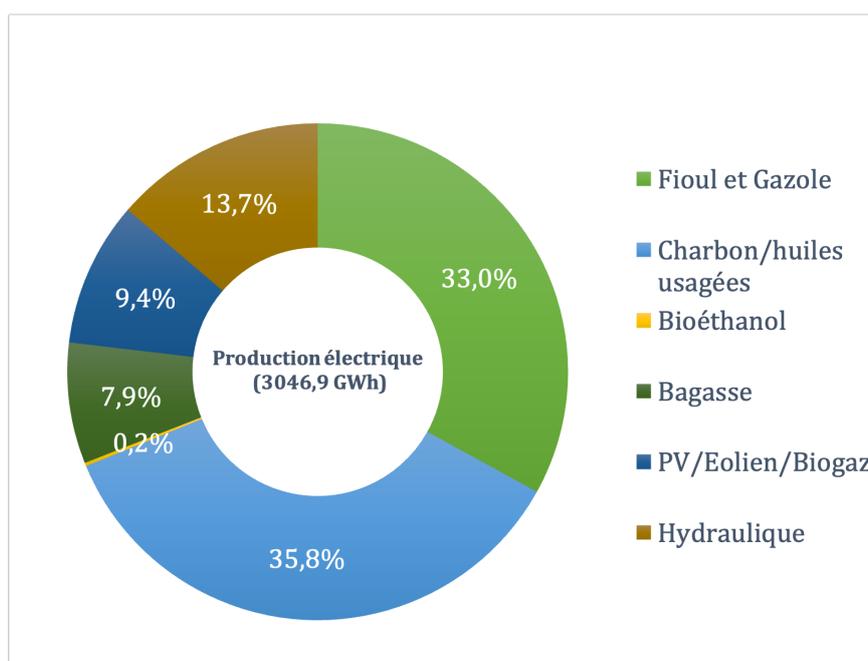


FIGURE 6.14 – Mix électrique réunionnais - 2019. Source Données : [Observatoire Energie Reunion 2020]

En considérant un parc de véhicules électriques représentant à peine 0,4% du parc automobile global (380 000 voitures individuelles), le poids des véhicules électriques dans la consommation d'électricité est encore marginal. Ainsi, le mix électrique ne concerne en 2019 qu'une production d'électricité à destination du résidentiel et du tertiaire [Observatoire Energie Reunion 2020]. Or, le passage de la flotte de véhicule au tout électrique en 2035 va induire une augmentation des besoins de productions d'électricité sur l'île. Cette augmentation va représenter un besoin de production annuelle supplémentaire de 1027,37

GWh, soit une augmentation de 34% de la production globale<sup>3</sup>. Trois principaux obstacles apparaissent.

Pour répondre à cette augmentation de 34% de la demande, de nombreux investissements devront être réalisés sur le secteur de la production d'électricité. En 2019, le parc de production électrique compte 19 infrastructures de production réparties dans toute l'île pour une puissance installée de 899,7 MW. La plus petite installation est une picocentrale hydraulique de 0,02 MW, et la plus grande est la Centrale du Port Est avec 211 MW fonctionnant avec des énergies fossiles. Même en considérant l'hydroélectricité, la part des énergies renouvelables dans le mix électrique peine à dépasser les 30%. Le territoire ne semble donc absolument pas préparé à l'arrivée de cette demande supplémentaire. Il reste une quinzaine d'année pour réaliser des investissements importants en matière d'énergie renouvelable pour répondre à cette transition tout-électrique de la mobilité individuelle. Le faible dynamisme constaté du côté des investissements en énergie renouvelables fait, cependant, penser à une incompatibilité entre la volonté politique européenne sur les véhicules électriques et les réalités territoriales locales. Les délais impartis (2035) sont contraints, et des décisions urgentes doivent être prises sur le choix des technologies de production à favoriser, le dimensionnement et leur localisation. La stratégie choisie impactera le territoire de manière durable.

### **La question de la vulnérabilité des ménages**

Le second obstacle repose sur le niveau de vie des ménages réunionnais. Avec un taux de pauvreté moyen de 38%, les ménages réunionnais peinent à assurer l'ensemble des postes de dépenses de leur budget et procèdent à un arbitrage drastique sur certaines dépenses, notamment concernant les biens composites. Le budget transport représente 19,7% du budget des ménages réunionnais [INSEE 2020]. En considérant le coût d'acquisition d'un véhicule électrique et l'électricité nécessaire pour l'utilisation du véhicule, pour que le transport n'excède pas 19,7% du budget global des ménages, et n'occulte donc pas les autres postes de dépenses, le salaire mensuel d'un ménage devrait s'élever à 1900€, alors que plus d'un tiers des ménages se situent en dessous de 1041€ mensuel par UC. Le budget nécessaire pour la voiture électrique semble donc difficile à atteindre. Le revenu minimal à percevoir selon la composition familiale a ainsi été simulé et présenté dans la Figure 6.15.

---

3. En considérant 2,20 déplacements journaliers pour une moyenne de 8,8 km par déplacements, ce sont 14,96 km réalisés en voiture particulière chaque jour [Syndicat Mixte Transport Réunion 2017]. En considérant le marché de véhicules électriques présents à La Réunion, et en calculant leur moyenne de consommation, nous obtenons une moyenne de 0,18815 kWh par km, soit un besoin annuel de 1027,37 GWh pour les déplacements quotidiens.

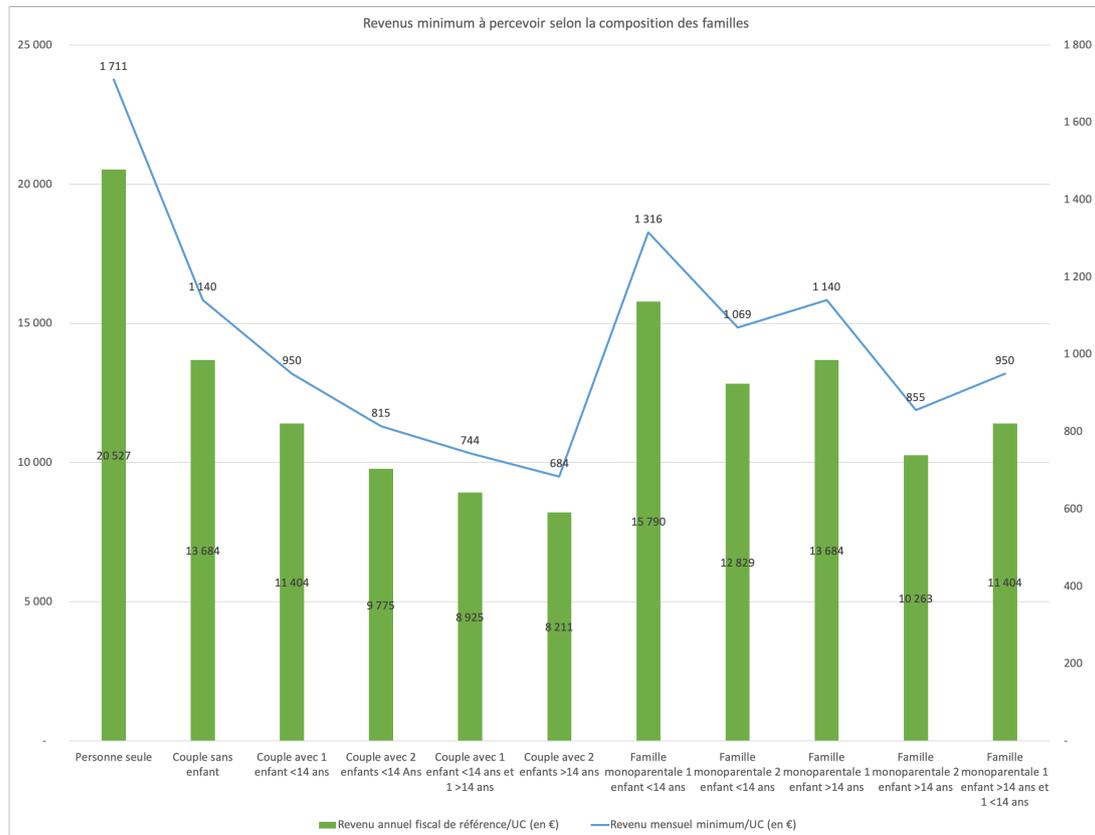


FIGURE 6.15 – Revenu minimal à percevoir selon la composition familiale

Complété par une étude des revenus moyens par décile à l'échelle de l'île, les résultats mettent en exergue que seuls 20% des ménages réunionnais ont un revenu suffisant, faisant ainsi basculer une grande majorité de l'île en situation de vulnérabilité (Figure 6.16).

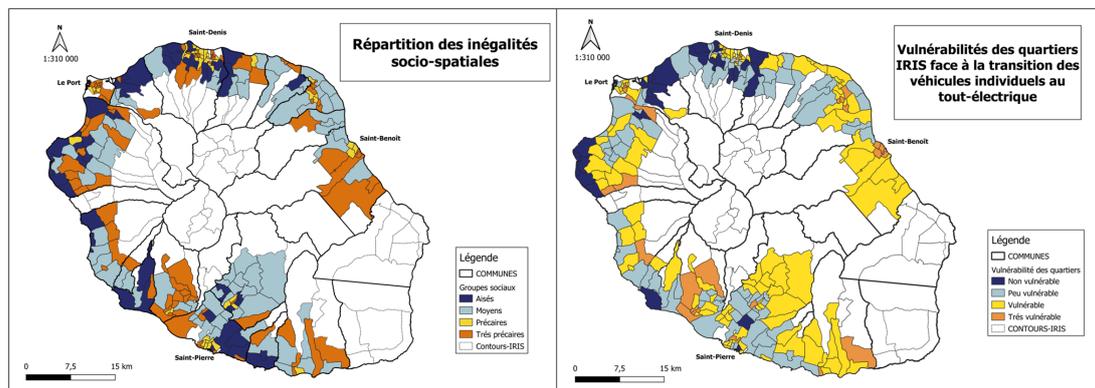


FIGURE 6.16 – Représentations spatiales des vulnérabilités sociales : simulation avant/après la transition tout électrique

Le passage au tout-électrique de la voiture aurait un impact considérable sur le territoire

réunionnais. Renforçant les inégalités territoriales, la transition tout-électrique risque de creuser les écarts Nord/Sud de l'île et les écarts centres/périphéries et espaces ruraux, exacerbant ainsi des inégalités déjà présentes sur le territoire. Outre une accessibilité limitée à la voiture individuelle et une incapacité à se déplacer pour les ménages vulnérables, le passage au tout-électrique risque d'avoir des répercussions majeures sur l'équilibre du territoire réunionnais.

### **Un marché local limité**

En 2022, seuls 20 modèles de véhicules sont proposés sur le marché local avec des prix qui représentent deux fois plus que les prix pratiqués pour les voitures thermiques. L'offre de véhicules électriques à la Réunion est, en effet, très récente et la gamme de véhicule proposée doit donc encore être élargie afin de pouvoir proposer des prix aussi attractifs que pour les véhicules thermiques. L'État a mis en œuvre un certain nombre d'aides à l'achat, en guise de mesure incitative.

Deux aides principales sont proposées par l'État pour l'acquisition de véhicules peu polluants : le bonus écologique et la prime à la conversion écologique. Les deux dispositifs, codifiés dans le Code de l'Énergie, sont cumulables et dépendants du prix d'acquisition. Ces aides proposées atteignent, dans le meilleur des cas, 34,28% du montant du véhicule le moins cher du marché. Cela reste insuffisant pour permettre aux véhicules électriques d'accroître leur part de marché sur le territoire. Pour qu'une transition au tout-électrique puisse se faire, l'investissement de l'État en faveur des ménages vulnérables devra être renforcé.

### **6.2.3 Les projets d'aménagements durables, outils de la transition énergétique**

L'urbanisme et l'aménagement du territoire en France se définissent par un ensemble de documents de planification stratégique articulés à différentes échelles par des relations de compatibilité et de prise en compte. Ces documents, plans et schémas sont organisés au sein d'une hiérarchie de normes et de règlements d'urbanisme. Les politiques et stratégies de développement des territoires d'outre-mer sont définies dans le Schéma d'Aménagement Régional (SAR). Opposable aux documents d'urbanisme locaux (échelle communale et intercommunale), le SAR apparaît comme chef de file en matière de développement du territoire et fixe les orientations fondamentales pour le développement et la mise en valeur du territoire et la protection de l'environnement [Journal Officiel de La République Française 1984][CGCT 2020]. À toutes les échelles, l'action des pouvoirs publics en matière d'urbanisme se fait dans le respect du développement durable. Il vise un certain nombre d'objectifs parmi lesquels : l'équilibre entre les populations vivant dans les zones urbaines et rurales, la diversité des fonctions urbaines, la prévention des risques naturels prévisibles ou encore la lutte contre le changement climatique [Journal Officiel de La République Françaises 2018][Code de l'Urbanisme 2018].

**Le SAR de la Réunion - Objectifs de développement du territoire**

Le SAR de La Réunion a été adopté en 1995 et révisé en 2011. Il met en avant quatre grands objectifs territoriaux, faisant écho aux principaux défis que le territoire doit relever [Réunion 2011]. Tout d'abord, le territoire doit répondre aux besoins d'une population croissante et protéger les espaces naturels et agricoles : l'amélioration de l'accès au logement fait partie des prescriptions de cet objectif. L'INSEE souligne le caractère primordial de l'anticipation des besoins en logements pour l'orientation des politiques publiques [INSEE 2018]. Ce caractère primordial est exacerbé à La Réunion en raison d'une croissance démographique plus forte qu'en métropole. D'ici à 2035, 169 000 logements supplémentaires devront être créés sur l'île, faisant du logement l'un des enjeux majeurs des prochaines années.

Ensuite, il est important de renforcer la cohésion de la société réunionnaise dans un contexte de plus en plus urbain : cet objectif renvoie à nouveau à la question du logement, ainsi qu'à celle de l'identité culturelle et du volet social. En effet, l'INSEE souligne en 2018 que 39% de la population réunionnaise vit sous le seuil de pauvreté métropolitain. La production de logements sociaux est donc un élément fort des politiques de développement du territoire dans les années à venir, ainsi que l'accès à l'emploi, notamment dans les zones rurales [INSEE 2019].

De plus, le territoire doit renforcer son dynamisme économique : le soutien aux filières d'excellence et la création d'emplois font partie des éléments significatifs de cet objectif.

Enfin, il est important de sécuriser le développement du territoire en anticipant le changement climatique : viser l'autonomie énergétique et concevoir un développement basé sur l'adéquation besoins/ressources font partie des prescriptions. Le SAR fait notamment référence à une gestion raisonnée et durable des ressources, mettant en avant l'approvisionnement et la disponibilité à long terme.

**Les projets d'aménagement durable à La Réunion - évaluation par effet de diffusion**

Dès les années 1970, la survenance et l'augmentation des catastrophes environnementales ont créé un contexte d'alerte qui ont permis l'émergence du concept de développement durable en 1987. Sous son prisme, la ville a d'abord été perçue de manière négative et ce n'est qu'à la fin des années 1990 que la notion de ville durable a commencé à émerger. Aujourd'hui, avec plus de la moitié de la population mondiale vivant en ville, développement durable et ville sont devenus indissociables. Bien que la popularisation de la notion de ville durable soit récente, on peut retrouver dès le début du XX<sup>e</sup> siècle des travaux intégrant les principes du développement durable. On peut ainsi citer les travaux de l'urbaniste Patrick Geddes [Geddes 1915], de Lewis Mumford [Mumford 1956] et Ian McHarg [McHarg 1967]. Leurs travaux mettent en exergue les avantages de la restauration écologique et sociale des villes existantes, en rupture donc avec les approches de villes nouvelles défendues par les urbanistes de l'époque. Ils critiquent la fonctionnalisation et l'individualisation des modes de vie, l'adaptation de la ville à l'automobile ; promeuvent la mixité fonctionnelle et sociale, le retour du vert en ville par la végétalisation des espaces publics, etc. En somme, leurs idées, en rupture avec les pratiques de l'époque, ont ouvert la voie au concept de développement

durable [Emelianoff 2010].

Afin d'apporter de nouvelles connaissances autour des villes durables, nous avons avancé l'hypothèse, en 2017, de la possibilité d'impulser le développement et dynamisme des territoires en identifiant des zones spécifiques où implanter les projets d'espaces durables. C'est à travers l'exemple de l'Île de La Réunion, où a foisonné un certain nombre de projets d'espaces durables depuis les années 2000, que nous avons tenté d'illustrer notre hypothèse. La question posée était la suivante : existe-t-il des lieux stratégiques où initier des projets d'espaces durables afin de s'assurer de retombées positives pour les régions voisines ? Répondre à cette problématique présupposait la définition de retombées positives : comment les identifier ? comment les caractériser ? C'est à travers un groupe de six variables d'analyses disponibles à l'échelle des quartiers IRIS que nous avons choisi d'analyser nos retombées. Ces variables caractérisent l'habitat dans les quartiers, la composition des ménages, les catégories socio-professionnelles, le nombre d'équipements divers (sportifs, commerciaux, culturels, santé, etc), la densité de population et les modes de déplacements principaux des actifs occupés. L'ensemble des données provenaient ainsi du Recensement Général de la Population produit par l'INSEE.

Notre analyse a porté sur deux quartiers ayant bénéficié d'opération de renouvellement urbain avec une ambition de ville durable pour l'un d'entre eux : la ZAC Beauséjour dans la ville de Sainte-Marie et l'opération RHI de l'Eperon. Notre unité d'étude est l'IRIS et nos analyses portent sur un indicateur créé pour les besoins de l'étude et traduisant l'évolution des différentes unités d'études. Grâce à la méthode présentée dans le chapitre précédent en section 5.3, nous avons effectué une analyse factorielle multidimensionnelle, puis procédé au calcul d'un indicateur composite permettant donc de décrire chaque IRIS étudié à travers une variable unique. L'objectif était ensuite de vérifier la présence de corrélations spatiales à travers cet indicateur composite. Dans la continuité de mes travaux de thèse, j'ai donc encadré sur ce travail un doctorant du laboratoire M. Kelvin PAVADEPOULLE afin de produire une étude d'autocorrélation spatiale [Pavadépoullé 2017]. L'objectif de l'autocorrélation est d'identifier s'il existe une relation plus forte entre voisins qu'avec le reste du groupe [Oliveau 2010]. Il s'agit de mesurer le degré auquel un attribut d'une localisation présente des similarités avec les attributs des localisations voisines [Le Gallo 2000]. Cette mesure passe par le calcul d'indices d'autocorrélation spatiale présenté dans la section 4.3.

Les résultats présentés dans la figure 6.17 nous présentent quatre types de corrélations observées grâce au calcul des LISA sur le territoire et leur significativité. Nous pouvons y observer l'évolution entre 2006 en 2012. Notre analyse a porté sur deux aspects : le premier est celui de la réussite des ambitions du renouvellement urbain. En effet, les deux quartiers ayant bénéficié de financements spécifiques pour un renouvellement de l'espace urbain, peut-on y observer une réelle évolution ? Le second point est le suivant : les changements opérés dans ces quartiers ont-ils une influence, un impact positif ou négatif sur les quartiers voisins ?

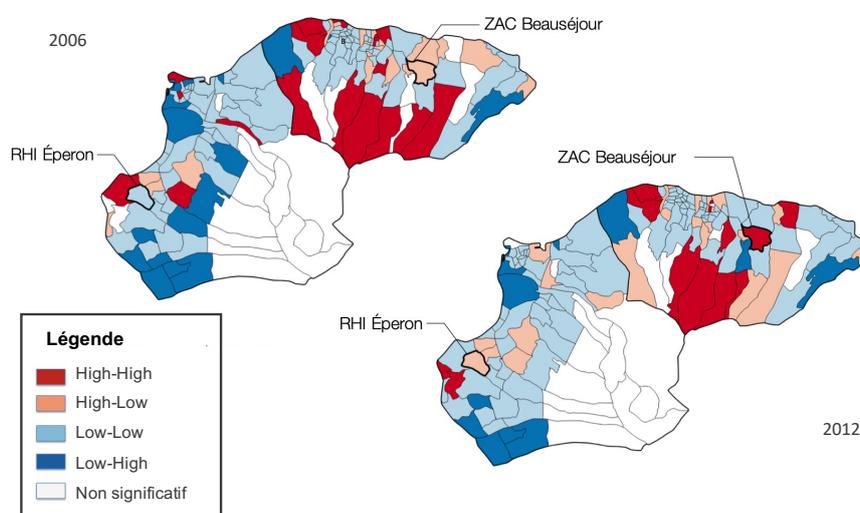


FIGURE 6.17 – Cartographie des indicateurs locaux d'association spatiale de l'indice composite

C'est ainsi qu'on observe des évolutions pour ces deux quartiers sur la période considérée. Dans le cas de l'Éperon, on observe une évolution positive pour le quartier sur la période. Il passe en effet d'une relation Low-Low, qui indique une concentration de valeurs basses sur la variable étudiée sur le quartier et autour du quartier, à une situation High-Low, qui indique que son évolution se fait soit au détriment des quartiers adjacents, soit qu'il n'y a pas de transferts/répercussions ou encore d'externalités positives pour ces derniers. Nous mesurons en effet une occurrence statistique, mais l'autocorrélation spatiale ne prétend pas expliquer de relations causales. Pour la ZAC-Beauséjour, opération labellisée écoquartier, l'évolution positive au sein du quartier se fait également sans diffusion aux quartiers directement adjacents, à l'exception d'un quartier. Dans les deux cas, les opérations de renouvellement ont eu des effets positifs sur les quartiers les hébergeant, mais il n'y a pas eu d'effets visibles, mesurables de diffusion aux quartiers adjacents. Ce fait permet alors de questionner sur l'objectif de rayonnement d'un écoquartier. En effet, pour réaliser un quartier durable, il ne suffit pas de réfléchir à la performance énergétique et thermique du bâtiment, il faut avoir une démarche de conception urbaine permettant d'intégrer le quartier dans le tissu de la ville [Charlot-Valdieu 2011]. Ainsi, mesurer la "performance" d'un écoquartier devrait aussi passer par la mesure de son intégration dans le tissu urbain de la ville. Les outils de l'autocorrélation spatiale peuvent ici fournir des pistes de mesure.

#### 6.2.4 La gestion durable des déchets plastiques

La gestion des déchets est un enjeu fort des politiques du développement durable [Bahers 2011]. Pour les milieux insulaires en particulier, la gestion des déchets représente un des défis majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle ? En effet, les territoires insulaires sont soumis à une double contrainte : foncière, tout d'abord, puisque les espaces ne sont pas extensibles ; "logistique", ensuite, puisque leur isolement les soumet à des régimes d'importations/exportations

particulièrement coûteux. L'île de La Réunion cumule en plus des spécificités climatiques, topographiques et géographiques qui viennent accentuer cette double contrainte : une densité forte sur des espaces restreints, la ceinture littorale Nord-ouest notamment, un attrait touristique générant une forte pression foncière, un relief accidenté et escarpé qui rend l'espace difficilement accessible à l'intérieur des terres, espace de toute façon protégé par un périmètre de Parc National, un climat humide qui impacte sur la qualité des déchets collectés (quantité plus importante de déchets verts, humidité des déchets recyclables). Le territoire de l'île est ainsi trop limité pour disposer d'un gisement de déchets dont le recyclage serait rentable sur ce seul territoire; les bénéfices environnementaux du recyclage compensent à peine son coût accru par le transport des déchets recyclés vers la métropole ou d'autres pays. Le principal mode de traitement des déchets ménagers et assimilés est, aujourd'hui, la mise en décharge avec le risque de développement de moustiques et de rongeurs sur ces sites. Une étude de l'ADEME [ADEME 2019] sur la caractérisation des déchets à La Réunion a permis d'identifier les ressources disponibles, notamment concernant les déchets plastiques. La majorité des déchets plastiques se retrouvent dans les ordures ménagères avec, d'une part, les déchets plastiques non triés et, d'autre part, les déchets plastiques non recyclables. Cela représente en moyenne 31 913 tonnes par an de plastique dans les déchets ménagers (soit 15% du total des déchets).

Concernant les déchets plastiques triés, seuls 75% sont conformes aux consignes de tri. La totalité est exportée, faute de modes de traitements disponible localement.

### **Cadre légal du traitement des déchets**

Le cadre réglementaire de la gestion des déchets est défini au niveau européen : suivant la hiérarchie des normes, chaque État membre doit transposer l'ensemble des directives européennes dans son paquet législatif/normatif national. En France, l'ensemble de ces directives est directement transposé dans le Code de l'environnement. Ainsi, la hiérarchie des modes de traitement des déchets définie par l'Union européenne est traduite dans l'article L541-1 du Code de l'environnement : dans l'ordre, la priorité doit être donnée à la préparation en vue du réemploi, au recyclage, à toutes les autres valorisations, notamment la valorisation énergétique, et enfin à l'élimination. Pour mettre en œuvre ces orientations au niveau local, chaque territoire doit alors établir une stratégie liée aux opportunités et contraintes locales. Ces plans et programmes traduisent les objectifs en termes concrets pour chaque territoire. La législation européenne en matière de gestion des déchets est régie par quatre directives connues sous le nom de "paquet économie circulaire". Chacune de ces directives renforce ses prédécesseurs avec des objectifs d'économie circulaire plus fort et fournissent un cadre pour la gestion des déchets dans toute l'Europe :

- (A) la directive sur les déchets 2018/851 [European Union : EUR-Lex 2018c];
- (B) la directive sur la mise en décharge 2018/850 [European Union : EUR-Lex 2018b];
- (C) la directive sur les déchets d'emballages 2018/852 [European Union : EUR-Lex 2018d];
- (D) la directive sur les véhicules hors d'usage, les batteries et les DEEE<sup>4</sup> 2018/849

---

4. (1) déchets d'équipements électroniques et électriques

[European Union : EUR-Lex 2018a].

En ce qui concerne la gestion des déchets plastiques, trois de ces directives nous fournissent le cadre réglementaire : les directives (A), (B) et (C).

La directive sur les déchets (A) souligne la nécessité d'une transition vers une économie circulaire et précise que les déchets doivent être reconnus comme une ressource. Cela change ainsi de manière radicale la façon dont les déchets sont considérés. Parmi les différentes typologies de déchets existantes, ce sont en particulier les déchets municipaux (c'est-à-dire les déchets ménagers) qui sont pointés du doigt par l'Europe, notamment du fait de la complexité de leur gestion. Cela amène l'Europe à les considérer comme un enjeu prioritaire dans toute politique locale de traitement des déchets. Afin de les considérer comme des ressources et non plus des déchets, l'Europe encourage les États membres à la mise en place de mesures incitatives et/ou dissuasives, telles que : les taxes de mise en décharge et d'incinération, les systèmes de tarification en fonction du volume des déchets, etc [European Union : EUR-Lex 2018c]. La directive sur la mise en décharge (B) fixe des seuils pour la mise en décharge et des objectifs assortis de délais : en 2035, seuls 10% maximum de la quantité totale de déchets municipaux seront autorisés à être mis en décharge. À cet objectif global s'ajoutent des objectifs de réutilisation et de recyclage : 55% des déchets ménagers en 2025 à 65% en 2035, avec un plateau à 60% en 2030. Pour les déchets d'emballages plastiques, la barre est fixée à 50% en 2025 et 55% en 2030. Ces objectifs et échéances sont repris dans la directive sur les déchets d'emballages (C) [European Union : EUR-Lex 2018d].

### Organisation de la gestion des déchets à La Réunion

À La Réunion, c'est La Région Réunion qui a la compétence de l'élaboration du plan de prévention et de gestion des déchets. Il est accompagné par des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), qui commandent deux syndicats (SYDNE pour le Nord et l'Est de l'île et ILEVA pour le Sud et l'Ouest), chargés de la collecte et du traitement des déchets [ILEVA 2021, SYDNE 2019]. Le mode de gestion principal présent sur l'île est l'enfouissement avec 65% des déchets mis en décharge. 9% des déchets sont recyclés, mais exportés en totalité vers l'Asie. Enfin, 26% des déchets sont valorisés (essentiellement du déchet végétal et quelques déchets divers (pneus, textiles, emballages plastiques).

Dans son nouveau plan de gestion des déchets, la Région Réunion a souhaité s'engager dans une démarche volontaire " zéro déchet " à l'horizon 2030. Plusieurs ambitions sont présentes dans ce nouveau plan : réduire de 88% les déchets ménagers et valoriser à hauteur de 100% les déchets produits. La valorisation devrait passer par une démarche de tri des matériaux recyclables en vue d'une valorisation matière (broyage, compost, amendement), et une valorisation énergétique (méthanisation des biodéchets ; Combustible Solide de Récupération (CSR) à partir de déchets non recyclables). Plusieurs leviers ont été référencés pour la mise en place de ces nouvelles politiques de gestion ou de valorisation [ILEVA 2021, SYDNE 2019] : (i) la valorisation énergétique via les CSR (61%), (ii) la valorisation matière (7%), (iii) l'exportation (10%) et (iv) la mise en décharge (22%). Dans cette vision de la Région Réunion, les plastiques seraient recyclés à 100%. Néanmoins, les voies de revalorisation ne sont pas explicitement identifiées.

Ce nouveau plan de gestion mérite une attention particulière. Une étude menée en 2018 par

le ministère de la Transition écologique et solidaire [CGEDD 2019] montre que les objectifs fixés sont hors de portée aux échéances prévues. De plus, la répartition envisagée ne respecte pas le règlement européen et la hiérarchie des modes de traitement des déchets. En effet, avec la valorisation énergétique comme premier mode de traitement, les orientations européennes ne sont pas respectées. En sus, l'étude met également en garde contre l'augmentation inévitable du coût de l'électricité liée aux investissements pour créer la filière de valorisation énergétique, risquant ainsi d'augmenter la précarité énergétique sur l'île.

#### Analyse de la politique de gestion des déchets

Sur la base de cette inadéquation entre la gestion des déchets actuelle et planifiée de La Réunion et le paquet économie circulaire européen, nous avons souhaité analyser plusieurs scénarios de gestion des déchets et les comparer à travers un prisme à trois niveaux d'enjeux : international, national et local. L'approche est qualitative, basée sur le cadre de Rubin défini dans [Givord 2014]. Il s'agit tout d'abord de choisir la variable ( $T$ ) qui représente la mesure politique appliquée et dont l'effet sera mesuré. On distingue alors  $T = 1$  lorsque la mesure est appliquée et  $T = 0$  lorsqu'elle ne l'est pas. Deux groupes d'individus émergent donc : ceux qui bénéficient de la mesure et ceux qui n'en bénéficient pas. Chaque groupe d'individus peut obtenir un bénéfice  $Y_{T_1}$  ou  $Y_{T_0}$  selon le groupe auquel il appartient. C'est ce bénéfice qui sera utilisé pour analyser l'efficacité ou l'inefficacité d'une politique publique. Il n'y a pas d'opposition entre les deux états observés ( $Y_{T_1}$  et  $Y_{T_0}$ ), simplement l'application ou non de la mesure [Bono 2012].

Sur la base de cette approche binaire, nous avons proposé une grille d'indicateurs basés sur les Objectifs de Développement Durable (pour la lecture internationale), l'économie circulaire (pour la lecture nationale) et les enjeux locaux de développement (pour la lecture locale) en notant, pour chaque scénario analysé, la mention ou non de la mesure visée. L'objectif est donc de vérifier si un aspect donné (représenté par un indicateur) est présent ou non dans chaque politique étudiée : si un indicateur  $I$  est bien présent dans une politique  $T_i$ , alors  $I_{T_i} = 1$ . Inversement, si un aspect couvert par un indicateur  $I$  n'apparaît pas dans une politique  $T_i$ , alors  $I_{T_i} = 0$ . Pour chaque cible de chaque catégorie, la question posée est la suivante : *Cette cible apparaît-elle expressément dans la politique?* Le tableau 6.4 permet de donner un aperçu de chaque cible analysée.

Quatre scénarios ont été passés au crible de notre grille d'indicateur : un scénario Business As Usual (BAU) qui correspond à la situation actuelle, un scénario Zero Waste Plan (ZWP) qui correspond à la traduction du plan de gestion de La Région Réunion, un scénario European Circular Economy Package (ECEP) traduisant les objectifs européens et enfin un scénario New Technology for Plastic Recovery (NTPR) introduisant une nouvelle technologie de traitement des déchets plastiques (Figure 6.18). Le plan NTPR introduit une nouvelle technologie de revalorisation matière pour les déchets plastiques sur le territoire et préconise ainsi 55% de valorisation matière des déchets plastiques pour 45% de valorisation énergétique. Cette nouvelle technologie vise une revalorisation matière pour l'habitat. La valorisation de la matière plastique présente en effet de nombreux avantages : excellente durabilité ; en phase avec la durée de vie des bâtiments ; forte isolation thermique et conforme aux attentes de la réglementation thermique en vigueur ; capacité à supporter les actions mécaniques du climat (cyclone) ; imputrescibilité : non tributaire des effets dévastateurs des développements

des moisissures ou des Composés Organiques Volatils (COV) provoqués par le climat tropical humide de l'île. Cette filière de recyclage pourrait répondre à plusieurs enjeux locaux : (i) limiter les importations de matériaux pour l'habitat, secteur en forte croissance dont les besoins en matériaux n'ont jamais été aussi importants ; (ii) supprimer le volume de déchets plastiques en décharge, permettant d'optimiser le volume et le foncier ; (iii) développer des matériaux adaptés au climat tropical humide de La Réunion ; (iv) développer des filières locales de transformation et de valorisation générant des emplois à différents niveaux d'expertise (de l'ouvrier à l'ingénieur).

TABLE 6.4 – Indicateurs

Catégories	Cibles
Sustainable Development Goals	Clean Water and Sanitation Clean and affordable energy Decent work and economic growth Industry, innovation and infrastructure Sustainable Cities and Communities Responsible consumption and production Climate Change Action Aquatic life Land degradation
Circular Economy pillars	Sustainable supply Eco-design Economy of functionality Responsible consumption Extension of the duration of use Recycling
Local challenges	Housing Employment Energy self-sufficiency Resources

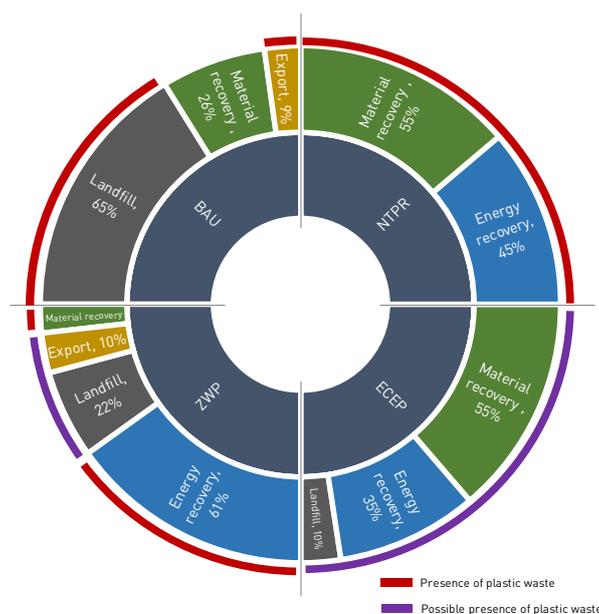


FIGURE 6.18 – Scénarios analysés - synthèse

Les résultats obtenus, présentés dans la figure 6.19, ont été centrés-réduits afin d'obtenir une échelle de lecture allant de 0 à 1, du moins performant sur la grille analysant au parfaitement performant.

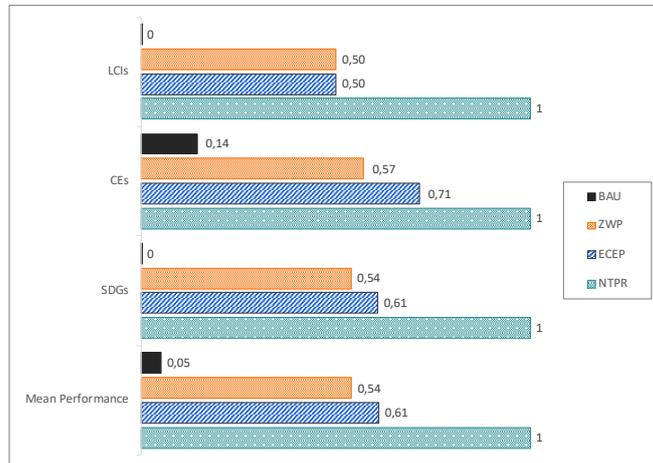


FIGURE 6.19 – Résultats de l'étude

Ce travail vise à fournir un cadre pour la planification de la gestion des déchets plastiques à la Réunion. Pour alimenter ce cadre, le cadre légal et réglementaire fournit les éléments clés. Bien que le principe de la hiérarchie des normes s'applique, le cadre juridique local peine à répondre aux exigences européennes. Ainsi, plusieurs séries de conclusions peuvent être tirées de ce travail. Dans un premier temps, le scénario BAU, en place depuis plusieurs décennies, est totalement déconnecté de l'ensemble des indicateurs analysés. Ceci alerte sur l'urgence d'agir sur la gestion des déchets plastiques sur le territoire. Ensuite, la proximité des scores des scénarios local (ZWP) et européen (ECEP) montre le manque d'ambition locale, même si le poids du système pyramidal de la hiérarchie des normes en France est visible dans les scores. En analysant les scores globaux des différents indicateurs, il apparaît que les réponses aux enjeux locaux sont les plus difficiles à satisfaire. Cela montre la nécessité de réorganiser la gestion des déchets en intégrant un niveau local. En revanche, le scénario NTPR offre un excellent score, mettant en évidence l'adéquation des filières de traitement identifiées (valorisation matière et énergétique) avec les ambitions environnementales et économiques de la France et de l'Europe, tout en répondant aux besoins du territoire. Ainsi, son champ d'action ne se limite pas aux déchets mais cherche à s'inscrire dans une gestion globale et transversale. Il répond au caractère multidimensionnel du traitement des déchets plastiques dans un contexte de transition énergétique et d'expansion démographique. De plus, il intègre une contrainte environnementale forte puisque la valorisation énergétique est centrée sur des systèmes vertueux tels que la cogénération et la gazéification. Considérant que la transition énergétique, le développement durable et le réchauffement climatique ont des effets locaux et régionalisés, on peut s'interroger sur la pertinence d'appliquer régionalement une réglementation nationale ou internationale. Il semble donc évident que la question de l'échelle de diagnostic serait la clé pour dicter les politiques territoriales en matière de gestion des déchets. La lecture croisée des besoins du territoire et du potentiel des déchets, comme le plastique,

est un élément essentiel de la méthode garantissant la circularité économique, environnementale et sociale. Le développement durable est l'un des trois principes fondamentaux de la recherche, de l'industrialisation et de la politique du XXI<sup>e</sup> siècle.

## 6.3 Conclusions du chapitre et projets de développement

La question des capacités territoriales est au cœur de mes préoccupations de recherche. Comment assurer une transition écologique sans exacerber les nombreuses difficultés et inégalités que peut connaître un territoire? Mes travaux se sont concentrés sur deux types d'approches : des diagnostics territoriaux, dans un premier temps, afin de mieux appréhender les terrains d'études sur les différents champs de la transition énergétique (production d'énergie renouvelable, consommation d'énergie, bâtiment, transport et mobilité); des analyses des politiques publiques, dans un second temps, menées afin d'évaluer leur efficacité et pertinence.

Les diagnostics ont permis de faire émerger de nombreux constats pour le territoire réunionnais, principal terrain d'étude. La pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique doit faire face à de nombreuses barrières dont des barrières liées à la structure du marché économique local, des barrières techniques liées au relief difficile, des barrières institutionnelles et sociales également avec un ralentissement de la progression des énergies renouvelables dans le mix électrique concomitant à la réduction des politiques incitatives de l'État, etc. La population et les logements sont les éléments déterminants les besoins énergétiques du territoire. Ainsi, la production de ratio de consommation par typologie de bâti permet d'envisager des analyses prédictives des besoins énergétiques, avec la possibilité de spatialiser ce besoin. La construction d'une donnée à une échelle fine permet de jongler entre les différentes échelles et de proposer des orientations pour le territoire de manière plus large. La production de données est en effet un élément clé de la planification pour la transition énergétique. Enfin, les études diagnostiques menées sur le transport et la mobilité ont permis de faire émerger deux constats principaux : des ménages et des zones précaires réparties sur l'île, notamment dans les zones périphériques et une offre de mobilité encore trop réduite sur le territoire.

Les évaluations *ex post* et *ex ante*, sur différentes politiques (énergie, mobilité décarbonée, projet d'aménagement durable et gestion des déchets) ont permis de mettre en avant des difficultés dans l'application des enjeux internationaux de transition énergétique au niveau local. En termes de planification énergétique, nos travaux ont pu montrer que le niveau local peine à suivre le rythme des évolutions des nombreuses mesures prises au niveau international et national. La multiplicité des outils et mesures semblent ajouter de la complexité dans leur mise en œuvre. Au niveau des ménages, les mesures sont parfois décorréées de la réalité quotidienne. À titre d'exemple, les décisions européennes en matière de décarbonation de la voiture individuelle risquent de faire basculer de nombreux ménages réunionnais en

situation de précarité sociale. Au niveau de la gestion des déchets plastiques, l'analyse de la politique locale sous trois grilles d'enjeux (internationaux, nationaux et locaux) montre que les enjeux locaux sont les plus difficiles à satisfaire. Quel que soit le champ d'analyse de la transition énergétique, il existe une décorrélation forte, une déconnexion entre le niveau local et le niveau national et international. Enfin, cette déconnexion est également visible à une échelle plus fine : l'analyse de possibles effets de voisinage de projets d'aménagements durables a permis de mettre en exergue la concentration des effets positifs sur le seul quartier concerné par l'aménagement durable. Ce constat permet de questionner sur les réflexions en silo réalisées en termes de planification durable alors même que la démarche prône l'intégration du projet de manière globale dans la ville.

### **Projets de développement**

Mes travaux sur les démarches de diagnostics et d'évaluations des politiques publiques dans le champ de la transition énergétique vont poursuivre sous quatre angles. En premier lieu, je souhaite poursuivre la production de ratios par typologie de bâti en intégrant la question de la production de déchets et la question de la mobilité. En complétant ainsi mon analyse par des données élargies sur des problématiques sociétales profondes, nous pourrions avoir une meilleure connaissance des flux d'énergie et de matière associés à une typologie de bâti et permettant d'appréhender le métabolisme urbain ou métabolisme territorial. Ce projet, pluridisciplinaire, est en cours de construction au sein du laboratoire PIMENT. Je m'associe à trois collègues spécialisés sur les questions d'éco-construction et matériau, gestion et traitement des déchets et Building information modeling. L'objectif global est de proposer des scénarios de développement d'un territoire insulaire (cas de La Réunion notamment), intégrant des contraintes de flux matière et énergie, afin de répondre aux enjeux de la transition énergétique.

Ensuite, la question des difficultés et inégalités m'a amenée à travailler ces dernières années sur la précarité énergétique, notamment liée à la mobilité. Afin de poursuivre dans cette ligne directrice, nous proposons, avec un collègue spécialisé en Énergétique, un sujet de thèse sur la décarbonation du secteur des transports à La Réunion.

▼-- DÉCARBONATION DU SECTEUR DU TRANSPORT EN MILIEU INSULAIRE : UNE APPROCHE PROSPECTIVE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX, ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX.

**RÉSUMÉ** – La transition énergétique est aujourd'hui un enjeu sociétal majeur exigeant la mise en place de procédures technologiquement innovantes et économiquement viables. Les territoires insulaires apparaissent comme des espaces particulièrement vulnérables qui doivent relever ce défi de façon urgente. Le changement climatique, la sécurité et la fiabilité énergétiques ainsi que la volatilité des prix sont des facteurs qui contribuent à la transformation socio-technique rapide des territoires insulaires. À l'île de la Réunion, en 2018, l'indépendance électrique est de l'ordre 36,5%, mais l'indépendance énergétique pla-

fonne à 12,8% à cause, notamment, du secteur des transports. Ce travail de thèse se focalise sur la transformation du secteur des transports en milieu insulaire. L'objectif de cette thèse est de construire différents scénarios d'évolution des transports à La Réunion afin d'identifier les trajectoires possibles de transformation énergétique du territoire. Ce travail exige un diagnostic complet des performances et des évolutions passées et futures du secteur des transports à la Réunion, en évaluant les impacts de ces changements sur la vulnérabilité économique et sociale des ménages. Cette thèse ambitionne de formuler un certain nombre de propositions concrètes permettant d'orienter les stratégies politiques régionales sur le développement des transports à la Réunion.

En outre, je souhaiterais amener le sujet des inégalités sur une question plus large que la notion de précarité énergétique et ainsi proposer une lecture multidimensionnelle des inégalités territoriales (en termes d'accessibilité aux équipements par exemple). Le but ultime est d'identifier les différentes formes de vulnérabilités territoriales et proposer une carte précise de ces vulnérabilités. En termes de politiques à mener dans le cadre de la transition écologique, ce type de carte pourrait être un outil précieux, un guide utile pour les pouvoirs publics, permettant de ne pas exacerber les inégalités existantes. À travers plusieurs facteurs clés, tels que le niveau de vie, le logement, la forme urbaine, le cadre de vie et le transport, il s'agirait de qualifier les forces et faiblesses de chaque territoire et ainsi identifier un niveau de vulnérabilité sur chaque facteur, pour ensuite les agréger.

Enfin, l'évaluation des politiques publiques en lien avec la transition énergétique va continuer à animer mes recherches. Les thématiques "Énergie" et "Déchet plastique" ont déjà été amorcées, je souhaiterais compléter à l'avenir par les questions du transport et de la mobilité, du logement et de l'attractivité économique des espaces ruraux. Parmi les méthodes envisagées, la question de l'utilisation de l'autocorrélation spatiale à des fins d'évaluation des politiques d'aménagement retient mon attention et pourrait être utilisée, notamment, pour la thématique attractivité économique des espaces ruraux. Une thèse mêlant mes questionnements sur les inégalités sociospatiales et sur l'attractivité des espaces ruraux est en cours de négociation auprès de la mairie de Saint-Joseph.

▼ – LA VALORISATION DE L'IDENTITÉ RURALE DANS UN TERRITOIRE EN MUTATION SOUS CONTRAINTE DE DUALITÉ FORTE ENTRE LES HAUTS ET LES BAS. ÉTUDE SUR UNE COMMUNE RURALE DE L'ÎLE DE LA RÉUNION : SAINT-JOSEPH.

**RÉSUMÉ** – L'opposition entre le rural et l'urbain est aujourd'hui encore maintenue par les pratiques et les représentations spatiales. Dans un contexte géographique contraint comme celui de la Réunion qui a connu une urbanisation forte, les séparations dichotomiques semblent vouloir s'effacer à la lumière d'un discours politique prônant la reconnaissance du caractère spécifique de la ville rurale et de ses spécificités. Ainsi, cette thèse est d'observer la question de l'attractivité de ces territoires ruraux au regard du dynamisme de la population. Par quels mécanismes peut-on aider au développement de ces territoires des

Hauts et participer ainsi au rayonnement global de la commune tout en gardant le côté traditionnel et identitaire du territoire? Quelles sont toutes les formes d'attractivité de ces territoires? De l'attractivité résidentielle à l'attractivité touristique, en passant par l'attractivité économique, quels sont les leviers à activer pour trouver un équilibre entre toutes ces formes d'attractivité et l'identité territoriale? Comment mettre en place un aménagement soutenable du territoire en lien avec les besoins de construction d'espaces bâtis et de développement d'activités ?

## 6.4 Travaux de référence de cette partie

### ▼Revue internationale avec comité de lecture

- ART.[1] **Bénard, F.**, Malet-Damour, B., (2022). Assessing potential of plastic waste management policies for territories sustainability : case study of Reunion Island – *World Development Sustainability, Volume 1*.
- ART.[2] Praene, J.-P., **Bénard, F.**, Ayagapin, L, Rachadi, M.H.M., (2021). The energy landscape of the Comoros : Furthering renewables for sustainable islands – *Renewable Energy*.
- ART.[3] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J.P., (2018). Sustainable urban planning for a successful energy transition on Reunion Island : From policy intentions to practical achievement. Volume 55, December 2018, Pages 1-13 *Utilities Policy*.
- ART.[4] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J.-P., Calixte, Y., (2018). Assess the local electricity consumption : the case of Reunion island through a GIS based method. *AIMS Energy*,6(3) : 436-452., doi : 10.3934/energy.2018.3.436.
- ART.[5] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J. P., (2016). Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 636-648.
- ART.[6] **Bénard, F.**, Vélia F., La transition tout-électrique de la voiture individuelle : des inégalités creusées? *Région et développement. In press*.

### ▼Colloques et congrès internationaux avec comité de lecture

- ACT.[1] Vélia, F., **Bénard, F.**, 2022. Le tout-voiture, vecteur des inégalités socio-spatiales à la Réunion : vers une mobilité plus douce? **58<sup>e</sup> colloque ASRDLF**, 29, 30 juin et 1er juillet, Rennes, France.
- ACT.[2] Pavadépoullé K., **Bénard-Sora, F.**, Praene J.-P., Gatina J.-C., 2017. Effets des projets d'aménagement sur le voisinage direct à l'échelle des aires urbaines. Analyse spatiale diachronique en milieu insulaire. **SAGEO Spatial Analysis and GEomatics**, Rouen, France.

- ACT.[3] Praene, J.-P., **Bénard-Sora, F.**, Ayagapin, L., Junot A., Marcel, P., 2017. Perception des habitants de la rénovation de la Ravine Blanche : Evaluation de questions de déplacements et environnementales, **54<sup>e</sup> Colloque de l'ASRDLF : "Cities and regions in a changing Europe : challenges and prospects"**, **15<sup>e</sup> Conférence de la section Grecque de l'ERSA**, 5-7 juillet, Athènes, Grèce.
- ACT.[4] **Bénard-Sora, F.**, Praene, J.P., Serra, L., 2017. La transition énergétique à l'épreuve des territoires : l'île de La Réunion entre ambitions politiques et réalisations concrètes, **Colloque - Transition énergétique et résilience des territoires – Planifier, construire, expérimenter**, Saint Briec, France.

▼ **Projets scientifiques**

- PRO.[1] **Bénard, F.**, Praene, J. P., (2019). Projet LOTOLA - Analyse du potentiel des stations de recharges. Rapport final. *Laboratoire PMENT, Université de La Réunion.*



# Conclusion générale

DANS l'usage, la conclusion d'un mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, comporte une synthèse brève des travaux réalisés et une mise en perspective des prolongements dans des projets en cours et futurs. Cet exercice a déjà été réalisé dans les conclusions des chapitres consacrés aux travaux sur la vulnérabilité énergétique et sur les diagnostics et politiques publiques en matière de transition énergétique. Je vais donc utiliser les dernières lignes de ce mémoire afin d'identifier les retombées éventuelles de mon travail sur un plan plus général en matière d'aide à la décision pour les pouvoirs publics, les aménageurs et les acteurs du développement des territoires.

En premier lieu, mes travaux d'exploration du milieu insulaire en général permettent la création de bases de données et d'analyses considérables pour l'étude de ces milieux dans le contexte de la transition énergétique. Utilisées à des fins de comparaisons ou d'analyse d'évolutions, ces bases peuvent alimenter des diagnostics et outils d'aide à la décision à des fins de mise en place de planification de la transition énergétique pour des territoires plus durables.

En deuxième lieu, les démarches évaluatives opérées ont permis de faire émerger une inadéquation entre les différentes échelles en matière d'enjeu de la transition énergétique. Des enjeux internationaux aux enjeux plus locaux, sur les études réalisées, on a constaté une déconnexion forte entre les besoins locaux et les recommandations internationales. Entre les problématiques de latence dans la mise en œuvre d'une politique internationale évoluant trop rapidement et les enjeux spécifiques du territoire, la mise en œuvre opérationnelle de la transition énergétique est fortement ralentie. Ce constat doit amener les décideurs, aménageurs et acteurs du territoire à réfléchir dans une approche *bottom-up* en faisant attention néanmoins aux dérives possibles en matière d'engagement et de financement.

En troisième lieu, les stratégies de transition et de décarbonation doivent pouvoir être alimentées par des diagnostics clairs. La création d'indicateurs de mesure facile d'interprétation de la vulnérabilité énergétique permettant à la fois de comparer, de traduire une évolution et d'évaluer une trajectoire est un atout considérable pour la mise en œuvre de politiques éclairées de planification sur un territoire.

Enfin, en quatrième lieu, les politiques de transition vont avoir des conséquences sur les territoires. La recherche d'une énergie décarbonée et de matériels moins énergivores risquent d'impacter les vulnérabilités sociales. Les dynamiques de transition actuelles, à l'image de la décarbonation de la mobilité individuelle sur le territoire réunionnais, risquent d'exacerber des inégalités sociales déjà prépondérantes. Afin de limiter ces externalités négatives pour

le territoire, il faudrait repenser les systèmes (système de production électrique, système de transport, etc.) de manière à proposer un accompagnement plus clair et inclusif de la transition énergétique et non un simple changement de modes productifs. Des décisions importantes devront être prises pour les territoires, nécessitant un engagement fort des pouvoirs publics, réorganisant les espaces, redessinant les paysages.

# Bibliographie

- [Abdallah 2009] Fatouma Abdallah. *Rapport sur le suivi et l'application de la stratégie de Maurice*. Rapport technique, Tech. rep., Union des Comores, 2009. (Cité en page 111.)
- [ADEME 2019] ADEME et ECOGEOS/ESPELIA. *Caractérisation des déchets sur l'île de la Réunion*. Rapport technique, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 2019. (Cité en page 142.)
- [Adger 1999] W. Neil Adger. *Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam*. *World Development*, vol. 27, no. 2, pages 249–269, 1999. (Cité en pages 76 et 86.)
- [Adger 2000] W. Neil Adger. *Social and Ecological Resilience : Are They Related?* *Progress in Human Geography*, vol. 24, no. 3, pages 347–64, 2000. (Cité en page 67.)
- [Adger 2004] W. Neil Adger, Nick Brooks, Graham Bentham, Maureen Agnew et Siri Eriksen. *New indicators of vulnerability and adaptive capacity*, Janvier 2004. (Cité en pages 67, 75, 76 et 86.)
- [Akorede 2010] Mudathir Funsho Akorede, Hashim Hizam et Edris Pouresmaeil. *Distributed energy resources and benefits to the environment*. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 2, pages 724–734, 2010. (Cité en page 110.)
- [Albeverio 2008] Sergio Albeverio, Denise Andrey et Paolo Giordano. *The dynamics of complex urban systems : An interdisciplinary approach*. Springer, 2008. (Cité en page 76.)
- [Alhamwi 2017] Alaa Alhamwi, Wided Medjroubi, Thomas Vogt et Carsten Agert. *GIS-based urban energy systems models and tools : Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas*. *Applied Energy*, vol. 191, pages 1–9, 2017. (Cité en page 116.)
- [Allen 2003] Katrina Allen. *Vulnerability reduction and the community-based approach*. In Mark Pelling, éditeur, *Natural Disasters and Development in a Globalising World*, chapitre 2, pages 170–184. Routledge, Londres, 2003. (Cité en page 67.)
- [Angeon 2008] Pascal Angeon Valérie et Saffache. *Les petites économies insulaires et le développement durable : des réalités locales résilientes?* *Etudes caribéennes*, vol. 11, 2008. (Cité en page 46.)
- [Angeon 2015] Jean-François Angeon Valérie et Hoarau. *Les petites économies insulaires : un monde à part entière? Nouveaux regards conceptuels et méthodologiques*. *Région et développement*, vol. 42, pages 5–13, 2015. (Cité en page 46.)
- [Anselin 1995] Luc Anselin. *Local indicators of spatial association—LISA*. *Geographical analysis*, vol. 27, no. 2, pages 93–115, 1995. (Cité en page 55.)
- [Aschan-Leygonie 2000] Christina Aschan-Leygonie. *Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux*. *Espace Géographique*, vol. 29, no. 1, pages 64–77, 2000. (Cité en page 69.)

- [BAFOIL 2014] François BAFOIL, Rachel GUYET *et al.* *Accès à l'énergie et consommateurs vulnérables : les enjeux de la précarité énergétique en Europe*. CERISCOPE, 2014. (Cité en page 134.)
- [Bahers 2011] Jean-Baptiste Bahers. *Écologie industrielle, gestion des déchets et territoire insulaire L'exemple de l'archipel des Fidji*, 2011. (Cité en page 141.)
- [Barreau 1969] Hervé Barreau. *Bergson et Zenon d'Élée*. *Revue Philosophique de Louvain*, vol. 67, no. 94, pages 267–284, 1969. (Cité en page 95.)
- [Barrocca 2013] Bruno Barrocca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua. *De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ?* *EchoGéo*, 2013. (Cité en pages 67 et 70.)
- [Becerra 2012] Sylvia Becerra. *Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain*. *VertigO, La revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 12, no. 1, 2012. (Cité en page 65.)
- [Berdoulay 2014] Vincent Berdoulay et Olivier Soubeyran. *Adaptation, science de la durabilité et pensée planificatrice*. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 22, no. 2, pages 114–123, 2014. (Cité en page 69.)
- [Bigo 2020] Aurélien Bigo. *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement*. PhD thesis, Institut polytechnique de Paris, 2020. (Cité en page 119.)
- [Blom 2011] Inge Blom, Laure Itard et Arjen Meijer. *Environmental impact of building-related and user-related energy consumption in dwellings*. *Building and Environment*, vol. 46, no. 8, pages 1657–1669, 2011. (Cité en page 116.)
- [Bonnafous 1996] A. Bonnafous et E. Tabourin. *Le modèle d'Alonso-Bussière revisité*. In *Communication aux Journées de Chamonix*, Chamonix, 1996. (Cité en page 57.)
- [Bono 2012] P.-H. Bono et A. Trannoy. *Causalité et contrefactualité dans l'évaluation économique des politiques publiques*. *Labyrinthe*, vol. 39, pages p. 32–53, 2012. (Cité en pages 128 et 144.)
- [Bouchard 2010] Christian Bouchard, Louis Marrou, Steve Plante, Rolph Payet et Eric Duchemin. *Les petits Etats et territoires insulaires face aux changements climatiques : vulnérabilité, adaptation et développement*. *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 10, no. 3, 2010. (Cité en page 46.)
- [Bouckaert 2014] Stéphanie Bouckaert, Vincent Mazauric et Nadia Maïzi. *Expanding renewable energy by implementing demand response*. *Energy Procedia*, vol. 61, pages 1844–1847, 2014. (Cité en page 112.)
- [Bouroche 2006] Jean-Marie Bouroche et Gilbert Saporta. *L'analyse des données*. Presses Universitaires de France, 2006. (Cité en page 78.)
- [Boutueil 2013] Virginie Boutueille *et al.* *Enjeux et défis de la transition énergétique dans les transports*. *Liaison Énergie-Francophonie*, 2013. (Cité en pages 119, 120 et 134.)
- [Brand 2007] Fridolin Simon Brand et Kurt Jax. *Focusing the meaning(s) of resilience : resilience as a descriptive concept and a boundary object*. *Ecology and Society*, vol. 12, 2007. (Cité en page 75.)

- [Briguglio 2009] Lino Briguglio, Gordon Cordina, Nadia Farrugia et Stephanie Vella. *Economic Vulnerability and Resilience : Concepts and Measurements*. Oxford Development Studies, vol. 37, no. 3, pages 229–247, 2009. (Cité en page 76.)
- [Bussière 1972] René Bussière. *Modèle urbain de localisation résidentielle*. Centre de recherche d'urbanisme, 1972. (Cité en page 57.)
- [Bénard-Sora 2016] Fiona Bénard-Sora et Jean Philippe Praene. *Territorial analysis of energy consumption of a small remote island : Proposal for classification and highlighting consumption profiles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, pages 636–648, 2016. (Cité en pages xii, 107, 112, 113 et 117.)
- [Bénard-Sora 2017] Fiona Bénard-Sora et Jean Philippe Praene. *Les Petits Etats Insulaires en Développement face au défi de la transition énergétique : entre forces et faiblesses, étude de leur vulnérabilité*. In "Les défis de développement pour les villes et les régions dans une Europe en mutation" ASRDLF-ERSA, page 24, Athènes, 2017. (Cité en pages 46, 63, 65, 72, 76, 80 et 111.)
- [Bénard-Sora 2018a] Fiona Bénard-Sora et Ulrike ALBERS. CAPTAIN "Communauté d'ApPrenTis- sage Actif et Interactif". Journée Pédagogie et Numérique, Saint-Denis, Réunion 2018. (Cité en page 21.)
- [Bénard-Sora 2018b] Fiona Bénard-Sora et Jean Philippe Praene. *Sustainable urban planning for a successful energy transition on Reunion Island : From policy intentions to practical achievement*. Utilities Policy, vol. 55, pages 1–13, 2018. (Cité en pages 105, 107, 108, 109, 110, 111 et 128.)
- [Bénard-Sora 2018c] Fiona Bénard-Sora, Jean-Philippe Praene et Yatina Calixte. *Assess the local electricity consumption : the case of Reunion island through a GIS based method*. AIMS Energy, vol. 6, no. 3, pages 436–452, 2018. (Cité en pages 116 et 117.)
- [Bénard 2012] Fiona Bénard. *Formes urbaines et transport en milieu insulaire : l'exemple de La Réunion*. PhD thesis, La Réunion, 2012. (Cité en pages xi, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60 et 61.)
- [Bénard 2019] Fiona Bénard et Jean-Philippe Praene. *LOTOLA, Analyse du potentiel des stations de recharge*. Rapport technique Version définitive, PIMENT, Université de La Réunion, 2019. (Cité en page 124.)
- [Bénard 2022a] Fiona Bénard. *Vulnerability and resilience : an attempt to theorize*. Advances in Environmental and Engineering Research, vol. in press, 2022. (Cité en page 64.)
- [Bénard 2022b] Florian Bénard Fiona et Vélia. *La transition tout-électrique de la voiture individuelle : des inégalités creusées ? Le cas de La Réunion*. Region et developpement, vol. In press, 2022. (Cité en pages 120 et 134.)
- [Campbell 1999] David J. Campbell. *Response to drought among farmers and herders in southern Kajiado District, Kenya : a comparison of 1972-1976 and 1994-1995*. Human Ecology, vol. 27, pages 377–415, 1999. (Cité en pages 76 et 86.)
- [Carbonnier 2012] Gilles Carbonnier et Jacques Grinevald. *Energy and development*. International Development Policy, vol. 2, 2012. (Cité en page 65.)

- [CGCT 2020] CGCT. *Article 4433-7, Code général des collectivités territoriales*, 2020. Online : accessed July 17 2021. (Cité en page 138.)
- [CGEDD 2019] CGEDD. *Gestion des déchets sur l'Île de La Réunion*. Rapport technique, Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019. Online : accessed 21 September 2021. (Cité en page 144.)
- [Chamussy 1984] Henri Chamussy, Maryvonne Le Berre et Jean-Paul Uvietta Patrice et Guérin. *La dynamique de systèmes : une méthode de modélisation des unités spatiales*. L'Espace Géographique, pages 81—93, 1984. (Cité en page 76.)
- [Chancel 2013] Lucas Chancel et Mathieu Saujot. *Inégalités, vulnérabilités et transition énergétique*. Policy Briefs, 2013. (Cité en page 134.)
- [Charlot-Valdieu 2011] Catherine Charlot-Valdieu et Philippe Outrequin. L'urbanisme durable. *Moniteur*, 2011. (Cité en page 141.)
- [Chen 2007] Fengzhen Chen, Neven Duic, Luis Manuel Alves et Maria da Graça Carvalho. *Renewislands—Renewable energy solutions for islands*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, no. 8, pages 1888–1902, 2007. (Cité en page 112.)
- [Cheng 2016] Min-Yuan Cheng, Kuan-Chang Chiu, Li-Chuan Lien, Yu-Wei Wu et Jing-Jhe Lin. *Economic and energy consumption analysis of smart building—MEGA house*. Building and Environment, vol. 100, pages 215–226, 2016. (Cité en page 116.)
- [Chevalier 2000] Gérard Chevalier. *L'entrée de l'urbanisme à l'Université : la création de l'Institut d'urbanisme (1921-1924)*. Genèses, no. 2, pages 98–120, 2000. (Cité en page 20.)
- [Chevalier 2009] Jean-Marie Chevalier. Les nouveaux défis de l'énergie : climat, économie, géopolitique. *Economica*, 2009. (Cité en page 106.)
- [Chiappini 2012] Raphaël Chiappini. *Les indices composites sont-ils de bonnes mesures de la compétitivité des pays?* Larefi Working Papers 1205, Larefi, Université Bordeaux 4, Avril 2012. (Cité en page 77.)
- [Chiradeja 2004] Pathomthat Chiradeja et R Ramakumar. *An approach to quantify the technical benefits of distributed generation*. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 19, no. 4, pages 764–773, 2004. (Cité en page 110.)
- [Cholez 2005] Céline Cholez, Lourdes Diaz Olvera, Dominique Mignot et Christelle Paulo. *Mobilité quotidienne et inégalités : le cas des personnes les plus démunies*. In MIGNOT Dominique (Eds.) BUISSON Marie-André, éditeur, Concentration économique et ségrégation spatiale, pages pp. 263–284. De Boeck Université, 2005. Papier sélectionné - ASRDLF. Concentration et ségrégation : dynamiques et inscriptions territoriales : XXXIX<sup>e</sup> colloque de l'ASRDLF, 1-3 sept. 2003, Lyon. (Cité en page 120.)
- [Cliff 1981] Andrew David Cliff et J Keith Ord. *Spatial processes : models & applications*. Taylor & Francis, 1981. (Cité en page 54.)
- [Code de l'Urbanisme 2018] Code de l'Urbanisme. *Article L101-2*, 2018. Online : accessed July 17 2021. (Cité en page 138.)
- [Dauphiné 2007] André Dauphiné et Damienne Provitolo. *La résilience : Un concept pour la gestion des risques*. Annales de géographie, vol. 654, no. 2, pages 115–125, 2007. (Cité en pages 68, 69, 70, 75, 95, 96 et 100.)

- [De Bruijn 2005] Karine M. De Bruijn. *Resilience and flood risk management, a system approach applied to lowland rivers*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal. Département d'informatique, Université de Delft, 2005. (Cité en page 75.)
- [Delbosc 2012] Alexa Delbosc et Graham Currie. *Choice and disadvantage in low-car ownership households*. *Transport Policy*, vol. 23, pages 8–14, 2012. (Cité en page 120.)
- [Demoraes 2009] Florent Demoraes. *De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur)*. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2009. (Cité en page 67.)
- [D'Ercole 2009] Robert D'Ercole et Pascale Metzger. *La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain*. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2009. (Cité en page 67.)
- [Dialga 2014] Issaka Dialga et Thi-Hang-Giang Le. *Développement d'indices composites et politiques publiques : interactions, portée et limites méthodologiques*. Working Papers hal-01071020, HAL, Octobre 2014. (Cité en page 77.)
- [Dimou 2007] Michel Dimou et Alexandra Schaffar. *Evolution des hiérarchies urbaines et loi de Zipf : le cas des Balkans*. *Région et Développement*, no. 25, pages 65–86, 2007. (Cité en page 53.)
- [Dobigny 2009] Laure Dobigny. *L'autonomie énergétique : acteurs, processus et usages. De l'individuel au local en Allemagne, Autriche, France*. *Consommer autrement. La réforme écologique des modes de vie*, Paris, L'Harmattan, pages 245–252, 2009. (Cité en page 110.)
- [Doumenge 1985] François Doumenge. *Les îles et les micro-Etats insulaires in Ces îles où l'on parle français*. *Hérodote Paris*, no. 37-38, pages 297–327, 1985. (Cité en page 72.)
- [Dugan 2001] Roger C Dugan, Thomas E McDermott et Greg J Ball. *Planning for distributed generation*. *IEEE industry applications magazine*, vol. 7, no. 2, pages 80–88, 2001. (Cité en page 110.)
- [Dupuit 2015] Élodie Dupuit, Emmanuel Ravalet et Vincent Kaufmann. *Motilité et mobilité : mode d'emploi*. *Alphil-Presses universitaires suisses*, 2015. (Cité en page 120.)
- [Durand 2012] Mathieu Durand et Sylvie Jaglin. *Inégalités environnementales et écologiques : quelles applications dans les territoires et les services urbains ?* *Flux*, vol. 89-90, no. 3-4, pages 4–14, 2012. (Cité en page 65.)
- [D'Ercole 1994] Robert D'Ercole, Jean-Claude Thouret, Olivier Dollfus et Jean-Pierre Asté. *Les Vulnérabilités Des Sociétés et Des Espaces Urbanisés : Concepts, Typologie, Modes d'analyse*. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 82, no. 4, pages 87–96, 1994. (Cité en pages 66, 67 et 69.)
- [Elahee 2014] Khalil Elahee. *Energy Management in a Small-Island Developing Economy : The Case of Mauritius*. In *Global Sustainable Communities Handbook*, pages 293–303. Elsevier, 2014. (Cité en page 112.)
- [Emelianoff 2010] Cyria Emelianoff. *La ville durable*. In Bertrand Zuideau, éditeur, *Développement durable et territoire, Environnement et société*, chapitre 14, pages

- 179–189. Presses universitaires du Septentrion, Villeneuve d’Ascq, 2010. (Cité en page 140.)
- [Enault 2003] Cyril Enault. *Vitesse, accessibilité et étalement urbain; analyse et application à l’aire urbaine dijonnaise*. PhD thesis, Université de Bourgogne, 2003. (Cité en page 57.)
- [European Union : EUR-Lex 2018a] European Union : EUR-Lex. *Directive (EU) 2018/849 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directives 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (Text with EEA relevance)*, 2018. Online : accessed July 13 2021. (Cité en page 143.)
- [European Union : EUR-Lex 2018b] European Union : EUR-Lex. *Directive (EU) 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste (Text with EEA relevance)*, 2018. Online : accessed July 13 2021. (Cité en page 142.)
- [European Union : EUR-Lex 2018c] European Union : EUR-Lex. *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance)*, 2018. Online : accessed July 13 2021. (Cité en pages 142 et 143.)
- [European Union : EUR-Lex 2018d] European Union : EUR-Lex. *Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste (Text with EEA relevance)*, 2018. Online : accessed July 13 2021. (Cité en pages 142 et 143.)
- [Fujita 1989] Masahisa Fujita. *Urban economic theory*. Cambridge Books, 1989. (Cité en page 133.)
- [Furfari 2007] Samuele Furfari. *Le monde et l’énergie. Enjeux géopolitiques. 1. Les clefs pour comprendre*. Technip, 2007. (Cité en page 65.)
- [Gallez 2022] Caroline Gallez. *La justice de la mobilité comme objet politique. Échelles spatiales et temporelles de la mobilité*, page 39, 2022. (Cité en page 121.)
- [Geary 1954] Robert C Geary. *The contiguity ratio and statistical mapping*. The incorporated statistician, vol. 5, no. 3, pages 115–146, 1954. (Cité en page 54.)
- [Geddes 1915] Patrick Geddes. *L’Évolution des villes*. Éd. Temenos, 1915. (Cité en page 139.)
- [Genin 2016] Didier Genin et Hubert Mazurek. *La résilience des systèmes socioécologiques : d’une intuition holiste à une difficile conceptualisation et mise en œuvre*. In *Résilience*, Hors collection, pages 63–92. Odile Jacob, 2016. (Cité en page 75.)
- [Gil 2008] Hugo A Gil et Geza Joos. *Models for quantifying the economic benefits of distributed generation*. IEEE Transactions on power systems, vol. 23, no. 2, pages 327–335, 2008. (Cité en page 110.)
- [Givord 2014] P. Givord. *Méthodes économétriques pour l’évaluation de politiques publiques*. Économie & prévision, vol. 204-205, pages p. 1–28, 2014. (Cité en pages 128 et 144.)
- [Gleyze 2007] Jean-François Gleyze et Magali Reghezza. *La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d’endommagement*. Géocarrefour, vol. vol. 82/1-, 2007. (Cité en page 65.)

- [Goavec 2015] Claire Goavec et Jean-François Hoarau. *Une mesure de la vulnérabilité économique structurelle pour une économie ultrapériphérique européenne : le cas de La Réunion*. Géographie, économie, société, vol. 17, no. 2, pages 177–200, 2015. (Cité en page 67.)
- [Gondard-Delcroix 2004] Sophie Gondard-Delcroix Claire et Rousseau. *Vulnérabilité et Stratégies durables de gestion des risques : Une étude appliquée aux ménages ruraux de Madagascar*. Développement durable et territoires, vol. Dossier 3, 2004. (Cité en page 69.)
- [Goze 2002] Maurice Goze et al. *La stratégie territoriale de la loi SRU*. REVUE D ECONOMIE REGIONALE ET URBAINE, no. 5, pages 761–776, 2002. (Cité en page 56.)
- [Graham 1995] Elspeth Graham. *Singapore in the 1990s : Can population policies reverse the demographic transition ?* Applied Geography, vol. 15, no. 3, pages 219–232, 1995. (Cité en page 112.)
- [Guerassimoff 2008] Gilles Guerassimoff et Nadia Maïzi. *Iles et énergie : un paysage de contrastes*, volume Collection. Mines ParisTech Les Presses, 2008. (Cité en page 71.)
- [Gunderson 2002] L.H. Gunderson et C. S. Holling. *Panarchy : Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Pre, Washington D.C., 2002. (Cité en page 67.)
- [Hansen 2019] Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois. *Energie. économie et politiques*. de Boeck Supérieur, 3e édition, 2019. (Cité en page 65.)
- [Holling 1973] C. S. Holling. *Resilience and stability of ecological systems*. Annual Review of ecology and systematics, vol. 4, no. 23, 1973. (Cité en pages 68 et 75.)
- [Hotelling 1933] Harold Hotelling. *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. Journal of Educational Psychology, vol. 24, 1933. (Cité en page 78.)
- [Hotelling 1936] Harold Hotelling. *Relations between two sets of variates*. Bio-metrika, vol. 28, pages 129–149, 1936. (Cité en page 78.)
- [ILEVA 2021] ILEVA. *Le taux de pauvreté reste stable en 2018 à La Réunion*. Rapport technique, Syndicat mixte de traitement des déchets des microregions sud et ouest de la Réunion, 2021. Online : accessed 28 September 2021. (Cité en page 143.)
- [INSEE 2017] INSEE. *La population réunionnaise à l'horizon 2050. Autant de séniors que de jeunes*. Rapport technique 29, INSEE Analyses, Novembre 2017. (Cité en page 112.)
- [INSEE 2018] INSEE. *Les besoins en logements à La Réunion à l'horizon 2035*. Rapport technique, Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques, 2018. (Cité en page 139.)
- [INSEE 2019] INSEE. *La Réunion face au défi du traitement des déchets*. Rapport technique, Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques, 2019. Online : accessed 17 July 2021. (Cité en page 139.)
- [INSEE 2020] INSEE. *Niveaux de vie et pauvreté à la Réunion en 2017*. Rapport technique 169, INSEE Flash, 2020. (Cité en page 136.)

- [INSEE 2021] INSEE. *Moins de 5 km de trajet du domicile au travail : 7 actifs sur 10 prennent la voiture, INSEE Flash Réunion*. Rapport technique no193, INSEE, Janvier 2021. (Cité en page 121.)
- [Jacquemot 2021] Pierre Jacquemot. *Le dictionnaire encyclopédique du développement durable*. Editions Sciences Humaines, Auxerre, 2021. (Cité en pages 46 et 112.)
- [Jauze 1998] Jean-Michel Jauze. *Les centralités emboîtées de l'espace réunionnais*. Mappemonde, vol. 51, no. 3, pages 27–30, 1998. (Cité en page 113.)
- [Jauze 2019] Albert Jauze, Joël-Paul Grillasca, Georges Chotard et Eric Boulogne. *Le chemin de fer à la réunion*. Canopé Editions, Paris, 2019. (Cité en page 121.)
- [Jerneck 2011] Anne Jerneck, Lennart Olsson, Barry Ness, Stefan Anderberg, Matthias Baier, Eric Clark, Thomas Hickler, Alf Hornborg, Annica Kronsell, Eva Lövbrand et Johannes Persson. *Structuring sustainability science*. Sustainability Science, vol. 6, no. 1, pages 69–82, jan 2011. (Cité en page 69.)
- [Jiang 2019] Yang Jiang, Peiqin Gu, Yulin Chen, Dongquan He et Qizhi Mao. *Modelling household travel energy consumption and CO2 emissions based on the spatial form of neighborhoods and streets : A case study of Jinan, China*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 77, page 101134, 2019. (Cité en page 117.)
- [Jones 2003] Roger Jones et Rizaldi Boer. *Assessing Current Climate Risks*. Rapport technique, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2003. (Cité en page 75.)
- [Jouffe 2013] Yves Jouffe et Marie-Hélène Massot. *Vulnérabilités sociales dans la transition énergétique au croisement de l'habitat et de la mobilité quotidienne*. 1er Congrès interdisciplinaire du Développement Durable, Quelle transition pour nos sociétés, pages 23–57, 2013. (Cité en page 133.)
- [Journal Officiel de La République Française 1984] Journal Officiel de La République Française. *Loi n° 84-747 du 2 août 1984 relative aux compétences des régions de Guadeloupe, de Guyane, de Martinique et de la Réunion.*, 1984. Online : accessed July 17 2021. (Cité en page 138.)
- [Journal Officiel de la République Française 1996] Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (1)*, 1996. (Cité en pages 116 et 128.)
- [Journal Officiel de la République Française 2005] Journal Officiel de la République Française. *Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique*, 2005. (Cité en pages 116, 128 et 129.)
- [Journal Officiel de la République Française 2009] Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*, 2009. (Cité en pages 128 et 130.)
- [Journal Officiel de la République Française 2010] Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (1)*, 2010. (Cité en pages 116, 128, 130 et 134.)
- [Journal Officiel de la République Française 2015] Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1)*, 2015. (Cité en pages 116, 128 et 130.)

- [Journal Officiel de la République Française 2019] Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat (1)*, 2019. (Cité en pages 116 et 128.)
- [Journal Officiel de La République Françaises 2018] Journal Officiel de La République Françaises. *Loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique*, 2018. Online : accessed July 17 2021. (Cité en page 138.)
- [Kaldellis 2012] JK Kaldellis, Ant Gkikaki, El Kaldelli et M Kapsali. *Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands : A case study : Agathonisi, Greece*. *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, no. 4, pages 476–485, 2012. (Cité en page 112.)
- [Kaufmann 2000] Vincent Kaufmann. *Gabriel Dupuy, La dépendance automobile : symptômes, analyse, diagnostic, traitements*. In *Les Annales de la Recherche Urbaine*, volume 86, pages 162–163. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 2000. (Cité en page 120.)
- [Kaufmann 2021] Vincent Kaufmann. *Histoire de la notion de mobilité*. In *Forum Vies Mobiles*, 2021. (Cité en page 119.)
- [Kaufmann 2022] Vincent Kaufmann et Etienne Piguet. *La Mobilité : Cause, Symptôme ou Solution au Changement Climatique ?* Rapport technique, National Center of Competence in Research – The Migration-Mobility Nexus, 2022. (Cité en page 119.)
- [Kennedy 2020] Steven Kennedy. *Regulatory Indicators for sustainable energy 2020, Sustaining the momentum*. Rapport technique, International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, December 2020. (Cité en page 90.)
- [Lajoie 2004] Gilles Lajoie. *Évolutions socio-économique et démographique à La Réunion : quelques conséquences en aménagement du territoire*. *Travaux & documents*, no. 22, pages 77–100, 2004. (Cité en page 121.)
- [Laterrasse 2018] Jean Laterrasse. *Urbanisme et trame urbaine : ce que nous apprend l'histoire des villes*. e-Phaïstos. *Revue d'histoire des techniques/Journal of the history of technology*, vol. 1, no. 2016, 2018. (Cité en page 58.)
- [Le Gallo 2000] Julie Le Gallo. *Econométrie spatiale (1, Autocorrélation spatiale)*. PhD thesis, Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (LATEC), 2000. (Cité en page 140.)
- [Leone 2006] Frédéric Leone et Freddy Vinet. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles*. *Analyses géographiques*. PULM, Presses Universitaires de la Méditerranée, Montpellier, 2006. (Cité en pages 65, 66, 67 et 70.)
- [Li 2018] Chaosu Li. *2.09 - GIS for Urban Energy Analysis*. In Bo Huang, éditeur, *Comprehensive Geographic Information Systems*, pages 187–195. Elsevier, Oxford, 2018. (Cité en page 117.)
- [Lopez 2003] Russ Lopez et H Patricia Hynes. *Sprawl in the 1990s : measurement, distribution, and trends*. *Urban affairs review*, vol. 38, no. 3, pages 325–355, 2003. (Cité en page 56.)
- [Lu 2014] Heli Lu et Guifang Liu. *Spatial effects of carbon dioxide emissions from residential energy consumption : A county-level study using enhanced nocturnal lighting*. *Applied Energy*, vol. 131, pages 297–306, 2014. (Cité en page 117.)

- [Lucas 2012] Karen Lucas. *Transport and social exclusion : Where are we now?* Transport policy, vol. 20, pages 105–113, 2012. (Cité en page 119.)
- [Ma 2017] Jia-Jun Ma, Gang Du, Zeng-Kai Zhang, Pei-Xing Wang et Bai-Chen Xie. *Life cycle analysis of energy consumption and CO2 emissions from a typical large office building in Tianjin, China*. Building and Environment, vol. 117, pages 36–48, 2017. (Cité en page 116.)
- [McHarg 1967] Ian McHarg. *Design with nature*. John Wiley & Sons, 1967. (Cité en page 139.)
- [Mendez 2006] VH Mendez, J Rivier, JI De La Fuente, T Gomez, J Arceluz, J Marin et A Mardurga. *Impact of distributed generation on distribution investment deferral*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 4, pages 244–252, 2006. (Cité en page 110.)
- [Mignot 2004] Dominique Mignot. *Mobilités et inégalités sociales*. In Jemelin C. Vodoz L. Pfister B., editeur, Les territoires de la mobilité. L'aire du temps. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004. (Cité en page 120.)
- [Mignot 2007] Dominique Mignot, Anne Aguilera, Danièle Bloy, David Caubel, Jean-Loup Madre, Laurent Proulhac et Florian Vanco. *Formes urbaines, mobilités et ségrégation : une comparaison Lille-Lyon-Marseille. Rapport final*. 2007. (Cité en page 57.)
- [Moran 1950] Patrick AP Moran. *Notes on continuous stochastic phenomena*. Biometrika, vol. 37, no. 1/2, pages 17–23, 1950. (Cité en page 54.)
- [Mumford 1956] Lewis Mumford. *Le déclin des villes ou la recherche d'un nouvel urbanisme*. Éd. France-Empire, 1956. (Cité en page 139.)
- [Nations Unies 1973] Nations Unies. *Rapport de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement*. Déclaration de Stockholm, Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, 1973. (Cité en page 46.)
- [Nations Unies 1992] Nations Unies. *17G. Développement durable des petits pays insulaires*. Action 21, Sommet de la terre - Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, 1992. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 1994] Nations Unies. *Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States*. Report of the Global Conference on the Sustainable Development of Small Island Developing States, 1994. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 1999] Nations Unies. *S-22/2. Déclaration et état des progrès accomplis dans l'application du Programme d'action pour le développement durable des petits États insulaires en développement et initiatives en la matière*. Résolution adoptée par l'Assemblée Générale, 1999. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 2002] Nations Unies. *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable*. Sommet Mondial pour le développement durable, Johannesburg, 2002. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 2005] Nations Unies. *Mauritius Strategy for the Further Implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing*

- States*. Report of the International Meeting to Review the Implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States, 2005. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 2017a] Nations Unies. *Energy profile : Comoros*. United Nations Environment Programme, 2017. (Cité en pages 108, 109 et 111.)
- [Nations Unies 2017b] Nations Unies. *Profil 2017 - Les Comores*. Rapport technique, Tech. rep., Commission Économique pour l'Afrique Bureau sous-régional pour l'Afrique de l'Est, 2017. (Cité en page 111.)
- [Nations Unies 2019] Nations Unies. *74/3. Déclaration politique issue de la réunion de haut niveau chargée d'examiner les progrès accomplis pour répondre aux besoins prioritaires des petits Etats insulaires en développement grâce à la mise en oeuvre des Modalités d'action accélérées des petits Etats insulaires en développement*. Résolution adoptée par l'Assemblée Générale, 2019. (Cité en page 47.)
- [Nations Unies 2021] Nations Unies. *List of Least Developed Countries (as of 24 November 2021)*. Committee for development policy, 2021. (Cité en pages 108 et 110.)
- [Nicholls 1999] Robert J. Nicholls, Frank Hoozemans et Marcel Marchand. *Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise : regional and global analyses*. Global Environmental Change 9, pages 69–87, 1999. (Cité en page 67.)
- [Nicolas 2002] Jean-Pierre Nicolas, Pascal Pochet et Hélène Poimboeuf. *Mobilité urbaine et développement durable : quels outils de mesure pour quels enjeux ?* Les cahiers scientifiques du Transport, no. 41, pages pp–53, 2002. (Cité en page 120.)
- [Nicolas 2012] Jean-Pierre Nicolas, Florian Vanco, Damien Verryet *al.* *Mobilité quotidienne et vulnérabilité des ménages*. Revue d'économie régionale et urbaine, vol. 1, pages 19–44, 2012. (Cité en page 120.)
- [Niles 2013] Keron Niles et Bob Lloyd. *Small Island Developing States (SIDS) & energy aid : Impacts on the energy sector in the Caribbean and Pacific*. Energy for Sustainable Development, vol. 17, no. 5, pages 521–530, 2013. (Cité en page 112.)
- [Observatoire Energie Reunion 2020] Observatoire Energie Reunion. *Bilan Energétique de La Réunion, Les chiffres clés*. Rapport technique Edition 2020, Horizon Réunion, 2020. (Cité en pages xii et 135.)
- [Oliveau 2010] Sébastien Oliveau. *Autocorrélation spatiale : leçons du changement d'échelle*. L'Espace géographique, vol. 39, no. 1, pages 51–64, 2010. (Cité en pages 54 et 140.)
- [Pages 1979] J.-P. Pages, F. Cailliez et Yves Escoufier. *Analyse factorielle : un peu d'histoire et de géométrie*. Revue de Statistique Appliquée, vol. 27, no. 1, pages 5–28, 1979. (Cité en page 78.)
- [Painuly 2001] J.P Painuly. *Barriers to renewable energy penetration ; a framework for analysis*. Renewable Energy, vol. 24, no. 1, pages 73–89, 2001. (Cité en pages 107, 108, 110 et 111.)
- [Pavadépoullé 2017] Kelvin Pavadépoullé. *Effets des projets d'aménagement sur le voisinage direct à l'échelle des aires urbaines : Analyse spatiale diachronique en milieu insulaire*. In Spatial Analysis and GEomatics 2017, 2017. (Cité en page 140.)

- [Pearson 1901] Karl Pearson. *On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space*. Philosophical Magazine, vol. 2, 1901. (Cité en page 78.)
- [Poudineh 2014] Rahmatallah Poudineh et Tooraj Jamasb. *Distributed generation, storage, demand response and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement*. Energy policy, vol. 67, pages 222–231, 2014. (Cité en page 110.)
- [Praene 2012] Jean Philippe Praene, Mathieu David, Frantz Sinama, Dominique Morau et Olivier Marc. *Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1, pages 426–442, 2012. (Cité en page 112.)
- [Praene 2018] Jean Philippe Praene, Mahéva Payet et Fiona Bénard-Sora. *Sustainable transition in small island developing states : Assessing the current situation*. Utilities Policy, vol. 54, pages 86–91, 2018. (Cité en pages 63, 72, 76 et 83.)
- [Praene 2019] Jean-Philippe Praene et Fiona Bénard. *Pathways for sustainable transition for European countries : A statistical analysis*. International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection, Sharjah, United Arab Emirates 2019. (Cité en pages 64 et 85.)
- [Praene 2021] Jean Philippe Praene, Damien Ali Hamada Fakra, Fiona Benard, Leslie Ayagapin et Mohamed Nasroudine Mohamed Rachadi. *Comoros's energy review for promoting renewable energy sources*. Renewable Energy, vol. 169, no. C, pages 885–893, 2021. (Cité en pages 107, 108, 109 et 111.)
- [Randriafeno Rajonandrianina 2022] Laurencia Randriafeno Rajonandrianina et Fiona Bénard. *La vulnérabilité des territoires insulaires, proposition d'une approche dynamique*. Communication présentée lors du 58<sup>e</sup> colloque ASRDLF, 29, 30 juin et 1er juillet 2022, Rennes, France 2022. (Cité en page 96.)
- [Reghezza-Zitt 2016] Magali Reghezza-Zitt. *Penser la vulnérabilité dans un contexte de globalisation des risques grâce aux échelles spatiales et temporelles*. Espace, Populations, Sociétés, no. 3, 2016. (Cité en page 67.)
- [Reghezza 2006] Magali Reghezza. *La vulnérabilité : un concept problématique*. In *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles*. Analyses géographiques, chapitre 3, pages 35–40. Université Paul Valéry, Montpellier, 2006. (Cité en pages 65 et 66.)
- [Roinsard 2011] Nicolas Roinsard. *Politique sociale et société créole : une sociologie des effets du RMI à la Réunion*. Revue des politiques sociales et familiales, vol. 106, no. 1, pages 39–48, 2011. (Cité en page 121.)
- [Roinsard 2013] Nicolas Roinsard. *Soixante ans de départementalisation à La Réunion : une sociologie des mutations de l'organisation sociale et de la structure de classe en contexte postcolonial*. REVUE Asylon (s), no. 11, 2013. (Cité en page 121.)
- [Roinsard 2014] Nicolas Roinsard. *Pauvreté et inégalités de classe à La Réunion. Le poids de l'héritage historique*. Études rurales, no. 194, pages 173–189, 2014. (Cité en page 120.)
- [Rosen 1980] Kenneth T Rosen et Mitchel Resnick. *The size distribution of cities : an examination of the Pareto law and primacy*. Journal of urban economics, vol. 8, no. 2, pages 165–186, 1980. (Cité en page 53.)

- [Réunion 2011] Région Réunion. *Schéma d'Aménagement Régional*. Rapport technique, Région Réunion, 2011. (Cité en pages 56 et 139.)
- [Sachs 2019] Jeffrey Sachs, Guido Schmidt-Traub, Christian Kroll, Guillaume Lafortune et Grayson Fuller. *Sustainable development report 2019*. Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN) : New York, NY, USA, vol. 2, 2019. (Cité en page 85.)
- [Saltelli 2010] A Saltelli et M Saisana. *Uncertainty and Sensitivity Analysis of the 2010 Environmental Performance Index*. Rapport technique JRC56990, Publications Office of the European Union, November 2010. (Cité en page 77.)
- [Sanseverino 2014] Eleonora Riva Sanseverino, Raffaella Riva Sanseverino, Salvatore Favuzza et Valentina Vaccaro. *Near zero energy islands in the Mediterranean : Supporting policies and local obstacles*. Energy policy, vol. 66, pages 592–602, 2014. (Cité en page 112.)
- [Saporta 2006] Gilbert Saporta. Probabilités, analyse des données et statistique. Editions technip, 2006. (Cité en page 78.)
- [Saujot 2012] Mathieu Saujot. *La mobilité, l'autre vulnérabilité énergétique*. Policy Brief, vol. 5, pages 1–6, 2012. (Cité en pages 120 et 134.)
- [Schaffar 2009] Alexandra Schaffar. *Croissance et hiérarchie urbaines dans les pays émergents*. PhD thesis, Université de la Réunion ; Université de Toulon Sud, 2009. (Cité en page 53.)
- [Sen 2017] Souvik Sen et Sourav Ganguly. *Opportunities, barriers and issues with renewable energy development—A discussion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, pages 1170–1181, 2017. (Cité en page 108.)
- [Sous-direction des Statistiques de l'énergie(SDES) 2021] Sous-direction des Statistiques de l'énergie(SDES). *Bilan énergétique de la France pour 2020*. Rapport technique, Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2021. (Cité en page 116.)
- [Spearman 1904] Charles Spearman. *Spearman, General intelligence objectively determined and measured*. American Journal of Psychology, vol. 15, pages 201–292, 1904. (Cité en page 78.)
- [SYDNE 2019] SYDNE. *Traitement des déchets ménagers et assimilés - Bassin Nord et Est - Île de la Réunion*. Rapport technique, Syndicat Mixte de traitement des déchets du Nord et de l'Est de La Réunion, 2019. Online : accessed 28 September 2021. (Cité en page 143.)
- [Syndicat Mixte Transport Réunion 2017] Syndicat Mixte Transport Réunion. *Synthèse Enquête Déplacements Grands Territoires*. Rapport technique, Ile de La Réunion, 2017. (Cité en pages 123 et 136.)
- [Taglioni 2006] François Taglioni. *Les petits espaces insulaires face à la variabilité de leur insularité et de leur statut politique*. Annales de Géographie, pages 664–687, 2006. (Cité en pages 71 et 72.)

- [Toubin 2012] Marie Toubin, Serge Lhomme, Youssef Diab, Damien Serre et Richard Lagarnier. *La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?* Développement durable et territoires, vol. 3, no. 1, 2012. (Cité en page 69.)
- [Tsikalakis 2007] AG Tsikalakis et ND Hatzigiorgiou. *Environmental benefits of distributed generation with and without emissions trading*. Energy Policy, vol. 35, no. 6, pages 3395–3409, 2007. (Cité en page 110.)
- [Turner 2003] B L Turner, Roger E Kasperson, Pamela A Matson, James J McCarthy, Robert W Corell, Lindsey Christensen, Noelle Eckley, Jeanne X Kasperson, Amy Luers, Marybeth L Martello, Colin Polsky, Alexander Pulsipher et Andrew Schiller. *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 100, no. 14, pages 8074 – 8079, jul 2003. (Cité en page 69.)
- [Union des Comores 2013] Union des Comores. *Expression of interest for climate investment funds. Scaling up Renewable Energy Program (SREP) in low income countries*. Ministry of Finance Economy Budget Investment and External Trade in charge of Privatization, 2013. (Cité en page 109.)
- [Union des Comores 2015] Union des Comores. *Expression of interest for climate investment funds. Scaling up Renewable Energy Program (SREP) in low income countries*. Ministère de la Production, de l'Environnement, de l'Energie, de l'Industrie et de l'Artisanat - Contributions Prévues Déterminées au niveau National de l'Union des Comores., 2015. (Cité en page 109.)
- [Villar 2014] Clara Villar et Michel David. *La résilience, un outil pour les territoires*. In Séminaire IT-GO Rosko, 2014. (Cité en pages 68, 70 et 73.)
- [Weisser 2004a] Daniel Weisser. *On the economics of electricity consumption in small island developing states : a role for renewable energy technologies ?* Energy Policy, vol. 32, no. 1, pages 127–140, January 2004. (Cité en pages 107 et 112.)
- [Weisser 2004b] Daniel Weisser. *On the economics of electricity consumption in small island developing states : a role for renewable energy technologies ?* Energy Policy, vol. 32, no. 1, pages 127–140, 2004. (Cité en page 112.)
- [Woloszyn 2013] Philippe Woloszyn et Béatrice Quenault. *Vulnérabilité territoriale et résiliences : résistances et capacités adaptatives face aux aléas climatiques*. In International Conference of Territorial Intelligence "Territorial Intelligence, Socio-Ecological Transition and Resilience of the Territories", 2013. (Cité en page 67.)
- [Yip 2001] Paul SF Yip, Joseph Lee, Beda Chan et Jade Au. *A study of demographic changes under sustained below-replacement fertility in Hong Kong SAR*. Social Science & Medicine, vol. 53, no. 8, pages 1003–1009, 2001. (Cité en page 112.)
- [Yu 1997] Xiaojiang Yu, Ros Taplin et Terubentau Akura. *A framework for energy policy-making in the Pacific Islands*. Energy Policy, vol. 25, no. 12, pages 971–982, 1997. (Cité en page 113.)